

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN MOTORES A REACCIÓN QUE UTILIZAN
BIOCOMBUSTIBLES

CESAR ALBERTO ROJAS DIAZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ D.C.

2016

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN MOTORES A REACCIÓN QUE UTILIZAN
BIOCOMBUSTIBLES

CESAR ALBERTO ROJAS DIAZ

Trabajo de Grado para Optar el Título como Ingeniero Aeronáutico

Director: Ing. FRANCISCO JAVIER GONZALES CRUZ

Jefe Área Diseño y Mantenimiento Aeronáutico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ D.C.

2016

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. 6 de Marzo de 2016

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

Dedico este proyecto a Dios y a todas las personas que me apoyaron de una u otra forma a lo largo de mi formación como Profesional

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres y hermanos por el apoyo incondicional durante el desarrollo de mi carrera profesional.

A los docentes y administrativos por los conocimientos y disposición durante todos estos años durante mi estancia en la universidad.

Al Profesor el ingeniero Francisco Javier Gonzales por las asesorías, consejos y acompañamiento en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos por todos los buenos momentos compartidos y experiencias durante mi paso por la universidad.

A mi novia por su respaldo y apoyo cada día.

A mis familiares por la ayuda que me brindaron en una u otra etapa mientras realizaba mi carrera.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	20
RESUMEN	22
INTRODUCCIÓN	23
1 OBJETIVOS	24
1.1 OBJETIVO GENERAL	24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2 JUSTIFICACIÓN	25
3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	26
4 METODOLOGÍA	27
4.1 FASE INICIAL	27
4.2 FASE INTERMEDIA	27
4.3 FASE FINAL	28
5. MARCO TEÓRICO	29
5.1 MOTOR A REACCIÓN	29
5.1.1 Tipos de motores a reacción	30
5.1.1.1 Motor Turboventilador	30
5.1.1.2 Motor Turbohélice	31
5.1.1.3 Motor Scramjet	31
5.1.1.4 Motor Ramjet	31
5.1.2 Funcionamiento del motor a reacción	31
5.1.2.1 Entrada o toma de aire	32
5.1.2.2 Compresor	33
5.1.2.3 Cámara de combustión	34
5.1.2.4 Turbina	34
5.1.2.5 Tobera o salida	35
5.2 CICLO TERMODINÁMICO DE BRAYTON	36

5.2.1 Ciclo abierto de Brayton	38
5.3 FUERZA DE EMPUJE	39
5.3.1 Cálculo de empuje	39
5.3.2 Presión gases en la tobera de salida	40
5.3.3 Empuje específico	41
5.3.4 Consumo específico de combustible	41
5.3.5 Eficiencia de los motores a reacción	42
5.3.5.1 Eficiencia térmica	42
5.3.5.2 Eficiencia propulsiva	44
5.3.5.3 Eficiencia motopropulsor	44
5.3.5.4 Eficiencia global	44
5.4 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	45
5.4.1 Proceso de contaminación en motores a reacción	45
5.4.1.1 Dióxido de carbono	46
5.4.1.2 Óxidos de nitrógeno	47
5.4.1.3 Hidrocarburos no quemados	47
5.4.1.4 Humos	47
5.4.1.5 Óxidos de sulfuro	47
5.4.1.6 Monóxido de carbono	47
5.4.1.7 Residuos de aditivos al combustible	48
5.4.2 Emisión de contaminantes en actuaciones del motor a reacción	48
5.4.3 Reducción de emisiones de contaminantes	49
5.5 EFECTO INVERNADERO	49
5.5.1 Gases efecto invernadero	50
5.5.1.1 Vapor de Agua (H ₂ O)	50
5.5.1.2 Dióxido de carbono (CO ₂)	51
5.5.1.3 Metano (CH ₄)	51
5.5.1.4 Óxido de Nitrógeno (N ₂ O)	51
5.5.1.5 Ozono (O ₃)	51
5.5.1.6 Clorofluorocarbonos (CFC)	51
5.5.2 Forzamiento Radiactivo	51
5.6 TIPOS DE COMBUSTIBLES DE ORIGEN FÓSIL PARA MOTORES A REACCIÓN	52
5.6.1 Querosenos tipo Jet	52
5.6.1.1 Jet A	52
5.6.1.2 Jet A-1	52
5.6.1.3 Jet B	52
5.6.2 Querosenos JP	53
5.6.2.1 JP1, JP2 y JP3	53

5.6.2.2 JP4	53
5.6.2.3 JP5	53
5.6.2.4 JP8	53
5.7 COMBUSTIBLES FÓSILES ALTERNATIVOS AL QUEROSENO	53
5.8 COMBUSTIBLES DE ORIGEN RENOVABLE – BIOCOMBUSTIBLES	54
5.8.1 Biomasa a Líquido	54
5.8.2 Bioqueroseno	54
5.8.3 Bioetanol	55
5.9. CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES	55
5.9.1 Biocombustibles de primera generación	55
5.9.2 Biocombustibles de segunda generación	55
5.9.3 Biocombustibles de tercera generación	56
5.9.4 Biocombustibles de cuarta generación	56
5.10 PROPIEDADES DE LOS BIOQUEROSENO EN ESTUDIO	57
5.10.1 Jatropa curcas	57
5.10.1.1 Condiciones climáticas para su producción	57
5.10.1.2 Propiedades	58
5.10.2 Camelina Sativa	58
5.10.2.1 Condiciones climáticas para su producción	59
5.10.2.2 Propiedades	60
5.10.3 Microalgas	61
5.10.3.1 Condiciones climáticas para su producción	62
5.10.3.2 Propiedades	62
5.10.4 Salicornia	63
5.10.4.1 Condiciones climáticas para su producción	63
5.10.5 Aceite de cocina usado	64
5.10.5.1 Etapas para la obtención de biocombustible mediante aceite vegetal usado	64
5.10.5.2 Propiedades	65
5.11 BIOCOMBUSTIBLES USADOS EN AVIACIÓN	66
5.11.1 Vuelos de prueba realizados con biocombustibles	67
5.11.2 Vuelos comerciales utilizando biocombustibles	69
5.12 NORMATIVA PARA BIOQUEROSENO	71
5.12.1 Norma ASTM 1655 queroseno para turbina de aviación civil	71
5.12.2 DEFSTAN 91-91 Combustibles tipo queroseno de aviación tipo JET A-1	73
5.12.3 ASTM 7566 Combustible alternativo para turbina de aviación civil	74

6. DETERMINACIÓN DEL BIOQUEROSENO Y MOTOR A REACCIÓN PARA CÁLCULO DE EFICIENCIA	75
6.1 JATROPHA CURCAS	76
6.1.1 Producción a nivel mundial	76
6.1.2 Producción en Colombia	76
6.1.3 Propiedades fisicoquímicas como bioqueroseno	78
6.1.4 Resultados en los motores	78
6.2 CAMELINA SATIVA	79
6.2.1 Producción a nivel mundial	79
6.2.2 Producción en Colombia	79
6.2.3 Propiedades fisicoquímicas como bioqueroseno	80
6.2.4 Resultados en los motores	81
6.3 MICROALGAS	81
6.3.1 Producción a nivel mundial	81
6.3.2 Producción en Colombia	82
6.3.3 Propiedades fisicoquímicas como bioqueroseno	82
6.3.4 Resultados en motores	82
6.4 ACEITE DE COCINA USADO	83
6.4.1 Producción a nivel mundial	83
6.4.2 Producción en Colombia	84
6.4.3 Propiedades Fisicoquímicas como Bioqueroseno	84
6.4.4 Resultados en los motores	84
6.5 MOTORES UTILIZADOS POR AEROLÍNEAS QUE OPERAN EN EL PAÍS	86
6.5.1 Motores usados por Avianca	86
6.5.2 Motores usados por LAN Colombia	87
6.5.3 Flota Viva Colombia	87
6.6 BIOQUEROSENO ESCOGIDO PARA CÁLCULOS DE EFICIENCIA	88
6.7 MOTOR ESCOGIDO PARA CÁLCULOS DE EFICIENCIA	89
7. ANÁLISIS PARAMÉTRICO	90
7.1 CONDICIONES PARA CÁLCULOS	90
7.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO	93
7.2.1 Análisis corriente fría motor CFM 56 5B-Series	94
7.2.2 Análisis corriente caliente del motor CFM 56 5B-Series	99
7.2.2.1 Etapa de alta	100
7.2.2.2 Etapa de baja	102
8. CÁLCULOS EFICIENCIA	106
8.1 EFICIENCIA TÉRMICA	106

8.2 EFICIENCIA PROPULSIVA	111
8.3 EFICIENCIA GLOBAL	112
8.4 ÁNALISIS DE DESEMPEÑO	113
8.4.1 Desempeño de presión y temperatura	113
8.4.2 Desempeño de la eficiencia térmica	115
8.4.3 Desempeño de la eficiencia propulsiva	117
8.4.4 Desempeño de la eficiencia global	118
8.4.5 Emisiones generadas en la combustión biocombustibles	120
CONCLUSIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	122

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del aceite obtenido de la planta jatropha curcas	58
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la planta de camelina	60
Tabla 3. Propiedades del cultivo de microalgas	62
Tabla 4. Propiedades de aceite de cocina usado	65
Tabla 5. Vuelos de prueba realizados con biocombustibles	67
Tabla 6. Vuelos Comerciales realizados con biocombustibles	69
Tabla 7. Requerimientos de los combustibles para turbina de aviación de la norma ASTM 1655	72
Tabla 8. Detalle de requerimientos de combustibles para turbina de aviación de la norma DEF STAN 91-91	73
Tabla 9. Requerimientos de los combustibles para turbina de aviación mezclados con 50% de biocombustible de la norma ASTM 7566	74
Tabla 10. Propiedades de la jatropha curcas	78
Tabla 11. Motores usando bioqueroseno de jatropha	78
Tabla 12. Propiedades de la camelina sativa	80
Tabla 13. Motores utilizando bioqueroseno de camelina	81
Tabla 14. Propiedades de las microalgas	82
Tabla 15. Motores utilizando bioqueroseno de microalgas	83

Tabla 16. Propiedades aceite de cocina	84
Tabla 17. Motores utilizando bioqueroseno de aceite usado	85
Tabla 18. Flota actual de la aerolínea Avianca	86
Tabla 19. Flota actual de la aerolínea LAN Colombia	87
Tabla 20. Flota actual de la aerolínea Viva Colombia	87
Tabla 21. Especificaciones Motor CFM 56-5B	91
Tabla 22. Datos para el análisis paramétrico	92
Tabla 23. Resultados de temperatura y presión según análisis paramétrico	113
Tabla 24. Comparativo de la eficiencia térmica usando bioqueroseno de camelina vs Jet A1 variando relación bypass	116
Tabla 25. Comparativo de la eficiencia térmica usando bioqueroseno de camelina vs Jet A1 variando relación bypass	117
Tabla 26. Comparativo de la eficiencia global usando bioqueroseno de camelina vs Jet A1 variando relación bypass	119

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Ciclo de Brayton en función de a. Volumen (v) vs Presión (p) y b. Entropía(s) vs Temperatura (T)	36
Gráfica 2. Ciclo de Brayton para motor a reacción en función de a. Volumen (v) vs Presión (p) y b. Entropía(s) vs Temperatura (T)	38
Gráfica 3. Presión del motor CFM 56 5B-Series según etapa del motor	114
Gráfica 4. Temperatura del motor CFM 56 5B-Series según etapa del motor	114
Gráfica 5. Eficiencia térmica usando camelina y Jet A1 vs bypass	116
Gráfica 6. Eficiencia propulsiva del motor CFM 56-5B series el vs bypass	118
Gráfica 7. Eficiencia Global usando camelina y Jet A1 vs bypass	119

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tercera ley de Newton aplicado a la aeronáutica	30
Figura 2. Partes principales en un motor a reacción	32
Figura 3. Ejemplo toma de aire	32
Figura 4. Compresor	33
Figura 5. Funcionamiento de un compresor	33
Figura 6. Proceso de combustión	34
Figura 7. Ubicación turbina en un motor a reacción	35
Figura 8. Tobera Convergente	35
Figura 9. Formas de tobera (a) convergente, (b) divergente	36
Figura 10. Etapas del ciclo de Brayton en un motor a reacción	37
Figura 11. Ciclo abierto de un motor a reacción	38
Figura 12. Etapas del empuje en un motor a reacción	39
Figura 13. Tipos de contaminantes que emiten los motores	46
Figura 14. Zonas de formación de contaminantes	48
Figura 15. Efecto invernadero	50
Figura 16. Ciclo de los biocombustibles	54
Figura 17. Fruto y semilla de la jatropha curcas	58

Figura 18. Camelina sativa en clima templado	59
Figura 19. Semilla de la camelina sativa	60
Figura 20. Sistema de cultivo de microalgas abierto (tipo raceway)	61
Figura 21. Sistema de cultivo de microalgas cerrado	62
Figura 22. Planta salicornia	64
Figura 23. Lugares geográficos de Colombia para producción de jatropha	77
Figura 24. Lugares geograficos de Colombia para producción de camelina	80
Figura 25 Motor CFM 56 5B	90
Figura 26. Etapas análisis paramétrico	93
Figura 27. Relación etapa de alta (HPT) y de baja (LPT) y ubicación de las temperaturas y presiones que se van a calcular	94
Figura 28. Distribución flujos másicos en motor bypass CFM 56 5B-Series	106
Figura 29. Representación de temperaturas en motor CFM 56 5B-Series	115
Figura 30. Emisiones generadas usando bioqueroseno de la camelina	120

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Ecuación general de empuje	39
Ecuación 2. Ecuación de empuje para motor a reacción	40
Ecuación 3. Empuje con diferencia de presiones	41
Ecuación 4. Empuje específico	41
Ecuación 5. Fórmula del consumo específico de combustible	42
Ecuación 6. Eficiencia térmica	42
Ecuación 7. Trabajo neto a la salida del motor	43
Ecuación 8. Rango de energía térmica liberada	43
Ecuación 9. Eficiencia propulsiva	44
Ecuación 10. Eficiencia motorpropulsora	44
Ecuación 11. Eficiencia global	44
Ecuación 12. Velocidad real según altitud de vuelo	94
Ecuación 13. Temperatura a la entrada del motor	95
Ecuación 14. Presión a la entrada del motor	95
Ecuación 15. Relación de compresión	95
Ecuación 16. Temperatura a la entrada del compresor	96
Ecuación 17. Relación de expansión crítica	96

Ecuación 18. Velocidad de salida	98
Ecuación 19. Temperatura a la salida de la corriente fría	98
Ecuación 20. Velocidad efectiva	99
Ecuación 21. Presión en turbina de alta	100
Ecuación 22. Eficiencia mecánica de la transmisión	100
Ecuación 23. Presión de alta	101
Ecuación 24. Eficiencia mecánica de la transmisión	102
Ecuación 25. Presión etapa de baja	103
Ecuación 26. Presión crítica	104
Ecuación 27. Temperatura crítica	105
Ecuación 28. Eficiencia térmica para motor turboventilador con bypass	107
Ecuación 29. Eficiencia propulsiva para motor turboventilador con bypass	111

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Datos de rendimiento según el tipo de motor y tecnología.	120
ANEXO 2. Datos de temperatura según el número de bypass	121

GLOSARIO

AEROLÍNEA: organización de transporte aéreo de orden nacional o internacional de carga y/o pasajeros.

AERONAVE: es un vehículo capaz de navegar por el aire y moverse por la superficie de la atmosfera terrestre; se clasifican en aerostatos (menos pesado que el aire) o aerodinos (más pesado que el aire).

ATMÓSFERA: capa gaseosa que rodea a la superficie terrestre.

BIOCOMBUSTIBLE: son combustibles renovables que se obtienen a partir de maíz, trigo, coco, azúcar y semillas no aptas para consumo humano como la camelina o jatropha; se caracterizan por reducir el dióxido de carbono CO₂ que se expande en el medio ambiente, ya que absorben el CO₂ a medida que crecen, produciendo así un ciclo cerrado.

BIOQUEROSENO: combustible de aviación que tiene las mismas características del queroseno convencional (Jet A) y se obtiene a partir de aceites vegetales.

CLIMA: son las condiciones de atmosfera de una región específica, se componen por humedad, presión, temperatura.

COMBUSTIÓN: es una reacción química donde se genera energía en forma de calor o luz, se crea mediante la combinación de un compuesto con oxígeno.

CONTAMINANTE: elemento que daña el medio ambiente.

CULTIVO: trabajo de la tierra y cuidado de la misma para producción de frutos y de esta forma obtener beneficios.

EFICIENCIA TÉRMICA: es un coeficiente adimensional que se calcula teniendo en cuenta la energía producida por un motor a reacción (maquina térmica) y la energía suministrada al motor.

EFICIENCIA PROPULSIVA: es un coeficiente adimensional el cual se calcula mediante el cociente de la energía suministrada a un motor a reacción y la potencia mecánica y está dada en valores adimensionales de porcentaje.

EMPUJE: reacción generada por una fuerza que crea una aceleración en un cuerpo (acción) y este cuerpo genera una fuerza igual y contraria (reacción).

GAS: estado de la materia donde las moléculas están ampliamente separadas, no tiene forma ni volumen.

INVERNADERO: lugar en el cual se crea un clima artificial para cultivar plantas que no están en su hábitat natural.

MOTOR A REACCIÓN: es el elemento motopropulsor en una aeronave, el cual toma la energía química presente en el combustible para transformarla en energía mecánica.

PLANTA: ser vivo formado tejidos y compuesto por células, vive sin moverse y se alimenta por fotosíntesis.

PRESIÓN: fuerza que se ejerce sobre un elemento o cosa.

QUEROSENO: es el combustible convencional usado en los motores a reacción en la actualidad, obtenido de una fracción de petróleo, con una densidad intermedia entre la gasolina y el diésel.

TEMPERATURA: propiedad termodinámica que establece el grado de calor de un cuerpo o cosa.

VELOCIDAD: magnitud física que relaciona el desplazamiento de un lugar a otro de un cuerpo y el tiempo que tarda dicho desplazamiento.

VUELO AEREO: viaje en avión o alguna otra aeronave.

RESUMEN

Hoy en día existe una alta dependencia hacia los combustibles derivados del petróleo, es sabido que el precio del petróleo está expuesto a una alta variación de precios¹, esto junto con las emisiones de gases efecto invernadero han llevado a las grandes compañías aeronáuticas a buscar otras fuentes de combustible que sean viables en el largo plazo, a nivel de producción y de economía, además de no afectar a los motores y por tanto la operación de las aeronaves; en la actualidad ya se han realizado vuelos comerciales con biocombustibles, más específicamente con el denominado bioqueroseno, actualmente se usa en una mezcla entre queroseno convencional y la parte restante deriva de aceites vegetales.

El propósito del presente proyecto es realizar un estudio de los bioquerosenos que han sido más utilizados en la industria aeronáutica hasta la fecha, que sean viables en cuanto a su producción y obtención y así escoger el más óptimo en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas para realizar un análisis de eficiencia en un motor a reacción tipo turboventilador utilizando el bioqueroseno en un cien por ciento, ya que no hay razones que impidan que el biocombustible de aviación sea 100% de origen vegetal²; con el bioqueroseno escogido y el motor se realizaran los cálculos de eficiencia, estos cálculos se realizan en la etapa de un vuelo crucero comercial, posteriormente se realiza un análisis paramétrico en el motor turboventilador y se determina la viabilidad del uso del bioqueroseno concluyendo finalmente si el bioqueroseno en cuestión mejora, iguala o disminuye la eficiencia de los motores comparado con un combustible de origen fósil.

El análisis que se realiza en el presente proyecto quiere dar a conocer el comportamiento de una aeronave utilizando biocombustibles y determinar si representa una ventaja viable para la aeronave así como lo es de antemano su precio, producción y obtención.

¹ ANCAP. Precio de decreto de los principales derivados(periodo 1975-2015). Disponible en: <http://www.ancap.com.uy/Precios%20Historicos/Listado%20de%20precios%20combustibles.pdf>

² REPSOL. Sala de prensa - Biocombustibles para volar más limpio. Primer vuelo español con bioqueroseno. Agosto 2012. Internet: http://www.repsol.com/es_es/corporacion/prensa/Newsletter/Biocombustibles-mas-limpio.aspx

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto la gran importancia e interés hacia mejorar el trato con el medio ambiente, los combustibles son un factor fundamental en toda la industria de motores tanto aéreos como terrestres, pero este acarrea una considerable contaminación hacia el medio ambiente mediante la emisión de gases efecto invernadero que provocan el calentamiento global; es por esto que los diferentes gremios recientemente han empezado a tomar medidas para dar solución a este problema mediante la implementación de combustibles más amigables para el medio ambiente como los son los combustibles alternativos para aviación entre ellos biocombustibles³.

Desde el año 2008⁴ se comenzó a utilizar biocombustibles para ayudar a reducir el cambio climático, en la industria automotriz se ha ido implementando el bioetanol y biodiesel; también en la industria aeronáutica se ha empezado a implementar el biocombustible de aviación conocido como bioqueroseno el cual se ha obtenido a partir de distintos aceites como lo son: Jatropha, camelina, algas, aceite de coco, salicornia, por nombrar algunos de los principales.

Los biocombustibles se han ido implementando paulatinamente en la industria aeronáutica, inicialmente en motores estáticos para pruebas, luego en vuelos de prueba y últimamente se han realizado vuelos comerciales utilizando una pequeña mezcla de bioqueroseno, dando prueba de que sí se pueden realizar vuelos utilizando este tipo de biocombustible, pero resulta interesante saber que tan eficiente se comporta el motor si el biocombustible se utiliza sin mezclar, ya que no hay razones que impidan que el biocombustible se use en un cien por ciento como biocombustible⁵.

³ OBSA. Combustibles alternativos para aviación. 2010. p.3. Internet: http://www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/260/Combustibles_alternativos_aviacion_ES.pdf

⁴ DUBB Graham. Partners carry out first biofuel flight using Virgin 747. 2008. Internet: <https://www.flightglobal.com/news/articles/partners-carry-out-first-biofuel-flight-using-virgin-747-221790/>

⁵ LOPEZ Marian. Aceite de camelina el nuevo queroseno de los aviones. El futuro de los biocombustibles en aviación. Internet: <http://www.ambientologa.net/2015/09/aceite-de-camelina-el-nuevo-queroseno.html>

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la eficiencia en un motor a reacción que utiliza biocombustibles mediante el proceso de análisis paramétrico de dichos motores.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los diferentes tipos de biocombustible usados actualmente en cuanto a sus características químicas, para determinar el más óptimo, según su poder calorífico, capacidad de producción en Colombia y que se haya usado en vuelos comerciales.
- Determinar la eficiencia térmica, propulsiva y total de un motor a reacción comercial, utilizando biocombustibles en un cien por ciento.
- Realizar un análisis paramétrico en un motor a reacción comercial que utilice biocombustible sin mezclar queroseno convencional, para determinar la viabilidad de su uso.
- Realizar un comparativo general de motores a reacción en aeronaves comerciales que utilicen combustible estándar y biocombustible para determinar cuál es el motor más usado en Colombia y pueda utilizar biocombustibles.

2. JUSTIFICACIÓN

Los biocombustibles se pueden encontrar en productos agrícolas así mismo se pueden extraer de residuos forestales como puede ser el rastrojo de maíz o el bagazo de la caña de azúcar, paja de trigo, aserrín. Otra fuente para la obtención de biocombustible son insumos vegetales no alimenticios de crecimiento rápido denominados “cultivos energéticos” y por último se puede obtener a partir de bacterias genéticamente modificadas⁶.

Mediante este estudio se podrá saber que tan claro es el panorama en cuanto al uso de biocombustibles en la industria aeronáutica colombiana, ya que se determinara un biocombustible para su uso en un motor a reacción comercial tipo turboventilador, y se analizara si el biocombustible en cuestión mejora la eficiencia del motor o si por el contrario la implementación del biocombustible no es viable en términos de rendimiento del motor utilizando este tipo de combustible renovable.

⁶ MACIEL Carlos Álvarez. Biocombustibles: Desarrollo Histórico Tecnológico, Mercados Actuales y Comercio Internacional. 2009. Internet: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQ_biocombustibles_4a_generacion_25608.pdf

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Mediante este proyecto se estudiara el uso de un biocombustible en un motor a reacción tipo turboventilador ya que son los más usados en la industria aeronáutica comercial⁷, partiendo que un biocombustible ayuda a mejorar la emisión de gases efecto invernadero reduciéndola considerablemente⁸, pero aparte de ayudar al cambio climático también se debe saber que tan viable es para un motor a reacción el uso de este biocombustible totalmente puro: ¿mejora o empeoran la eficiencia de los motores?, ¿Qué tipos de biocombustible son los más óptimos para los motores?.

Estas son las incógnitas que se pretenden estudiar y aclarar mediante este proyecto, si es viable para el medio ambiente el uso del biocombustible ¿también lo será para el motor y toda la aeronave? o si no resulta ser tan eficiente el uso de biocombustibles.

⁷ UPM Universidad Politécnica de Madrid. La industria aeroespacial. 4.6.1.2 Motores a reacción.2007.Internet:

<https://www.aero.upm.es/departamentos/economia/investiga/Informe%202007/46Motores.html>

⁸ OBSA. Op., Cit. p.10.

4. METODOLOGÍA

4.1 FASE INICIAL

Para el desarrollo del proyecto se comenzará con la recopilación de información acerca de los diferentes tipos y características de bioquerosenos que se utilizan o se pueden utilizar en motores a reacción comerciales, esta información se puede obtener por medio de organizaciones encaminadas al estudio de los bioquerosenos y que tienen una amplia investigación en este campo como páginas web donde hay diferentes artículos relacionados con el tema de bioquerosenos; de estas páginas web se podrá obtener la información referente a los bioquerosenos como características químicas, propiedades, peso específico, para luego escoger uno de ellos según su capacidad de producción en Colombia, poder calorífico cercano al Jet A-1 y que el bioqueroseno en estudio sea utilizado en el país en algún vuelo para luego realizar los cálculos de eficiencia.

El motor a reacción escogido para este proyecto es de tipo turboventilador, debido a que las aerolíneas en su gran mayoría utilizan aeronaves con motores de este tipo⁹, por tanto también se investigara las aerolíneas comerciales a nivel nacional que en sus motores han realizado vuelos con biocombustible, el estudio se realizara para referenciar cuales motores a reacción comercial son aptos para realizar vuelos con bioqueroseno y se escogerá un motor el reacción comercial que tenga mayor uso en el país para realizar el análisis paramétrico y los cálculos de eficiencia.

4.2 FASE INTERMEDIA

Con las características obtenidas de los diferentes bioquerosenos se extraerán las características fisicoquímicas para con estos datos más los parámetros de entrada del motor se puedan realizar los cálculos de eficiencia en los que influye el biocombustible en el motor como lo son: Potencia, eficiencia térmica, eficiencia propulsiva, eficiencia total, velocidad de crucero, consumo específico de combustible y análisis térmico.

Estos cálculos van guiados hacia la etapa de vuelo crucero en un motor comercial, debido a los cambios de presión densidad y temperatura a dicha altitud, es necesario saber el comportamiento del biocombustible en esta etapa de vuelo y

⁹ UPM. Op., Cit. Numeral 4.6.1.2.

concluir si el biocombustible en cuestión en verdad mejora la eficiencia de los motores comparado con un combustible de origen fósil.

4.3 FASE FINAL

En esta se fase se realizará un análisis paramétrico con el motor a reacción turboventilador que utilice combustible estándar versus el bioqueroseno puro estudiado, haciendo revisión de la eficiencia tanto del combustible general versus el biocombustible.

Posteriormente se concluirá si con los cálculos de eficiencia realizados con el bioqueroseno es mucho más eficiente que el combustible estándar y así mismo determinar cuáles son las ventajas y desventajas del uso de bioqueroseno.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 MOTOR A REACCIÓN

Es el mecanismo propulsor de una aeronave, siendo el encargado de transformar la energía química de la mezcla de combustible-aire en energía cinética que resulta del chorro de gases que se expulsa a gran velocidad desde el interior para generar un empuje, esto de acuerdo a la segunda y tercera ley de Newton.

2ª Ley: "El aumento en la cantidad de movimiento es igual al impulso de la fuerza aplicada".

3ª Ley: "A toda acción le corresponde una reacción igual y de sentido contrario"¹⁰

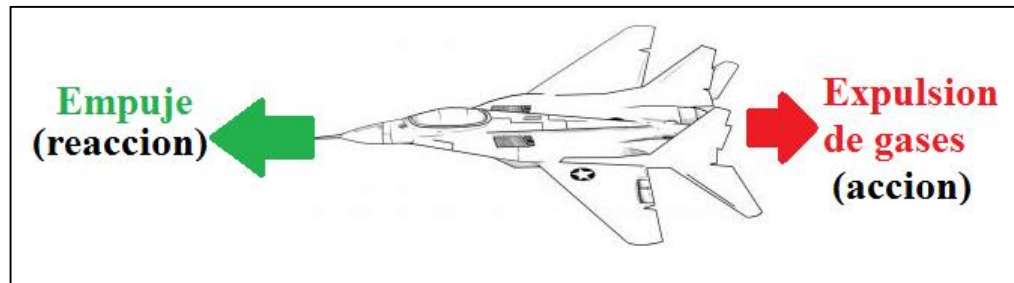
Este principio de funcionamiento aplica para diferentes tipos de motores como los son: turborreactores, turboventiladores, cohetes, estatorreactores, y motores de agua.

La segunda ley lo que expresa es que la fuerza que se le aplica a un cuerpo es igual a su masa por la aceleración que desarrolla al aplicarle dicha fuerza, mientras que la tercera ley habla que cuando se aplica una fuerza a algo, ese algo replica esa fuerza de igual forma y en sentido contrario; aplicando esto a un motor de aviación quiere decir que el motor absorbe una masa de aire y dicha masa acelera al motor y cuando el aire sale por la parte posterior del motor este aire sale acelerado, esto con respecto a la segunda ley.

Y la tercera ley habla que el aire le aplica al motor una fuerza exactamente igual y de sentido contrario, esto quiere decir que el aire sale impulsado hacia atrás y el motor hacia adelante.

¹⁰ CUESTA ALVAREZ MARTIN. Motores a reacción. Madrid: Paraninfo. 1980 p. 49

Figura 1. Tercera Ley de Newton Aplicado a la Aeronáutica



Fuente: Imagen disponible en: www.coloriage-pour-colorier.com/image/coloriage-avion-7.gif;
Modificada por autor del proyecto

5.1.1 Tipos de motores a reacción.

Existen una gran variedad de motores a reacción entre los que se encuentran principalmente los siguientes:

5.1.1.1 Motor Turboventilador. Este tipo de motor consta de un ventilador en la parte frontal del motor, el aire entrante se divide en dos caminos: flujo de aire primario y flujo secundario o flujo derivado por ello este motor también se denomina de doble flujo (bypass), el flujo primario penetra al núcleo del motor compuesto por compresores y turbinas y el flujo secundario se deriva a un conducto anular exterior y concéntrico con el núcleo.

Este motor se caracteriza principalmente porque tiene un ventilador (fan en inglés), en la parte delantera del motor, el cual absorbe una gran cantidad de aire, lo acelera y posteriormente lo expulsa a mayor velocidad por la parte posterior y así suministrar el empuje necesario a la aeronave.

Este motor presenta varias ventajas respecto a los turborreactores: consumen menos combustible lo que los hace más económicos, producen menor contaminación y reducen el ruido ambiental, este tipo de motor a reacción es el más utilizado en las aeronaves comerciales.

Los motores turbofan se pueden dividir en 2 tipos: Bajo índice de doble flujo (low bypass) siendo este el primer tipo de motor turboventilador en desarrollarse teniendo bastante uso en la aviación comercial, hasta que se sustituyó por los motores turbofan de alto índice de doble flujo (high bypass), siendo estos mucho más modernos donde la mayor parte del empuje llega del ventilador, teniendo un amplio uso en la aviación comercial.

5.1.1.2 Motor Turbohélice. Es un tipo de turbina de gas que mueve una hélice para generar la sustentación a una aeronave, los gases de escape contienen muy poca energía para producir un empuje necesario a la aeronave es por esto que se utiliza una turbina conectada a un eje y proveer el empuje necesario. Aproximadamente un 90% del empuje es producido por la hélice y el 10% restante por los gases de escape.

5.1.1.3 Motor Scramjet. Es un estatorreactor de combustión supersónica, más conocido como scramjet, es una variación de un estatorreactor con la diferencia de que el proceso de combustión se lleva a cabo supersónicamente. A mayores velocidades, es necesaria combustión supersónica para maximizar la eficiencia del proceso de combustión. Este tipo de motor lo componen aeronaves caza militares los cuales superan hasta 3 veces la velocidad del sonido.

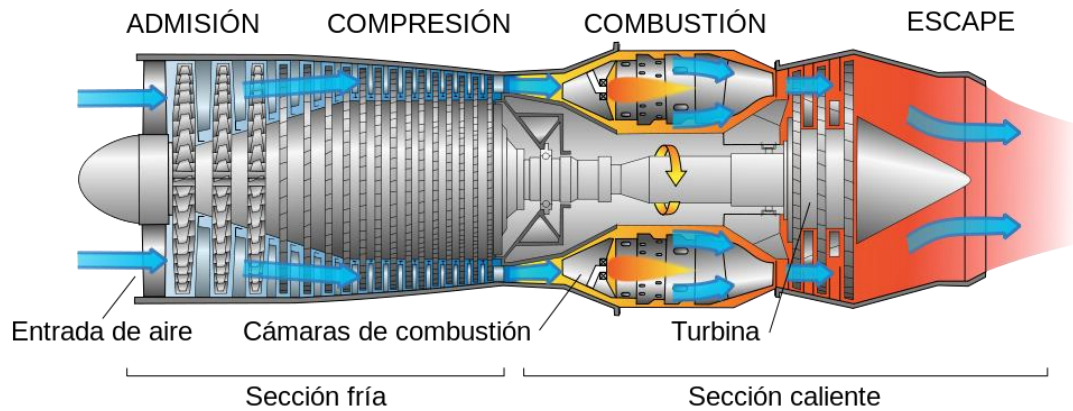
5.1.1.4 Motor Ramjet. Un estatorreactor es un tipo de motor de reacción que carece de compresores y turbinas, pues la compresión se efectúa debido a la alta velocidad a la que ha de funcionar. El aire ya comprimido se somete a un proceso de combustión en la cámara de combustión y una expansión en la tobera de escape, la diferencia con respecto a los scramjet es que estos actúan a velocidad subsónica.

5.1.2 Funcionamiento del motor a reacción.

El motor a reacción consta de las siguientes partes principales para su funcionamiento:

- Toma de Aire - Admisión
- Compresores – Compresión
- Cámara de combustión – Combustión
- Turbina
- Tobera – Escape

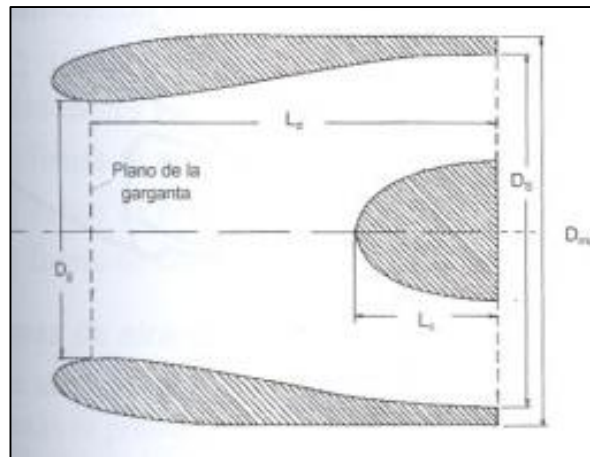
Figura 2. Partes principales en un motor a reacción



Fuente: Imagen Disponible en:
es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_reacci3n#/media/File:Jet_engine_spanish.

5.1.2.1 Entrada o toma de aire. Es un conducto por donde el aire entra al motor, la entrada de aire hacia el motor consiste en una apertura que está diseñada para reducir la resistencia y tomar el aire que llega de afuera en todas las condiciones de vuelo para posteriormente llevar el aire hasta la entrada de los compresores. El aire que alcanza que entra en un motor normal debe viajar a una velocidad inferior a la del sonido.

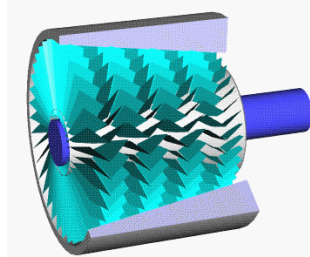
Figura 3. Ejemplo toma de aire



Fuente: OÑATE, Antonio Esteban. Conocimientos del Avión 2005 p. 315

5.1.2.2 Compresor. Tiene como función principal comprimir el aire que llega de la admisión, aumentando la energía del aire, elevando la presión por medio del giro mecánico de los compresores.

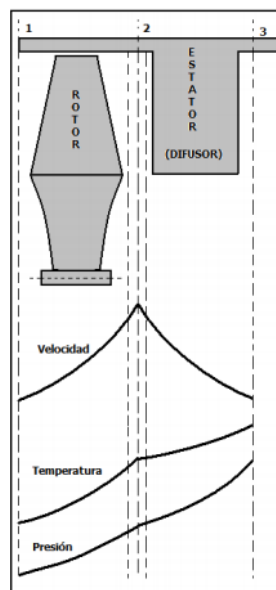
Figura 4. Compresor



Fuente: KENOBI-LJN. Como funciona un motor a reacción Disponible en:
www.enocasioneshagoclick.com/2009/06/escuadron-click-como-functiona-un-motor.html

El compresor está compuesto de varias etapas. Cada etapa consiste en álabes que rotan y estatores que permanecen estacionarios. El aire pasa a través del compresor, incrementando su presión y temperatura. La energía se deriva de la turbina que pasa por el rotor.

Figura 5. Funcionamiento de un compresor

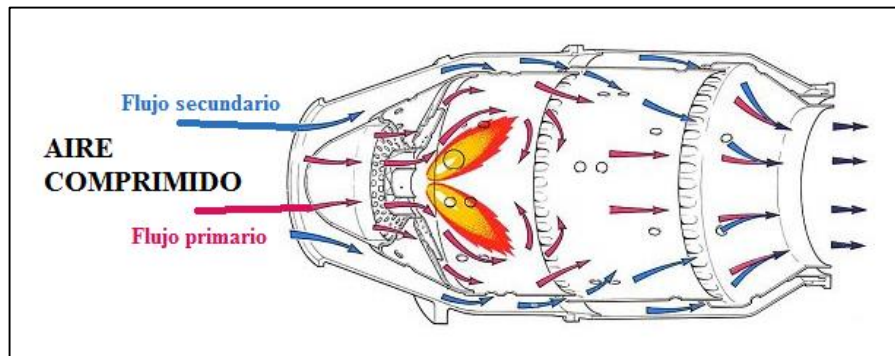


Fuente: SANCHEZ RAMOS, Jorge Alberto. Algoritmos de mejoramiento de las características de la turbina refrigerada. 2007. p.9

5.1.2.3 Cámara de combustión. Es el lugar donde llega el aire del compresor, llegando a la entrada de la cámara a alta presión y se divide en dos flujos; uno de los flujos llamado flujo primario se dirige por el tubo interno y se mezcla con el combustible para formar la mezcla de aire combustible y posteriormente inflamar la mezcla, alcanzando una temperatura en promedio de 2000°C a 2200°C, generando de esta forma la combustión.

El otro flujo llamado flujo secundario viaja por la parte más cercana a la pared de la carcasa de la cámara de combustión el cual consta de unos orificios para refrigerar el material del tubo y que el flujo secundario entre en el proceso de combustión, en la parte final de la cámara, se mezclan ambos flujos para reducir la temperatura de la combustión.

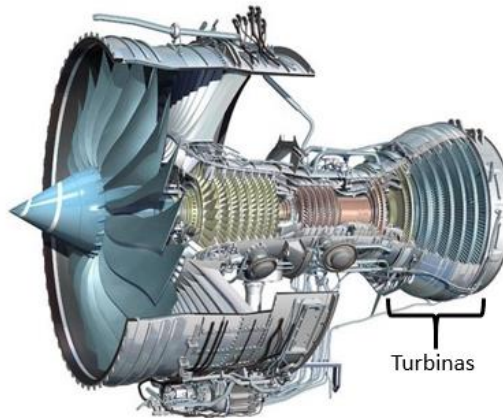
Figura 6. Proceso de combustión



Fuente: ROLL ROYCE. *The Jet Engine*. Ch 4 Combustion chambers. 1996. p. 37; modificada por autor del proyecto.

5.1.2.4 Turbina. Actúa como un molino de viento y extrae la energía de los gases calientes producidos en la cámara de combustión. Esta energía se usa para mover el compresor a través de un eje que los conecta, la turbina se compone de varias etapas de turbina que tienen alabes que giran conocidos como estatores y otros que se encuentran estáticos llamados rotores las etapas de turbina tienen como misión producir la mayor potencia en su eje y accionar el ventilador o “fan” generado de esta manera el empuje necesario para mantener la aeronave a un vuelo constante.

Figura 7. Ubicación turbina en un motor a reaccion

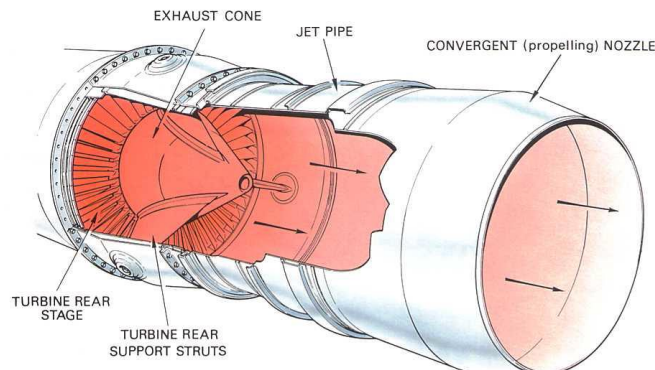


Fuente: ROLL ROYCE, Technical focus: the jet engine, Rolls-Royce Trent 1000 Gas Turbine; modificada por autor del proyecto

5.1.2.5 Tobera o salida. Los gases calientes que salen de la turbina dejan el motor hacia la atmósfera a través de una tobera, cuyo objetivo es producir un aumento de la velocidad de estos gases, pero la expansión de estos gases desde la tobera debe ser total para ello existen diferentes tipos de tobera como lo son las toberas convergentes, toberas divergentes o toberas convergente-divergente.

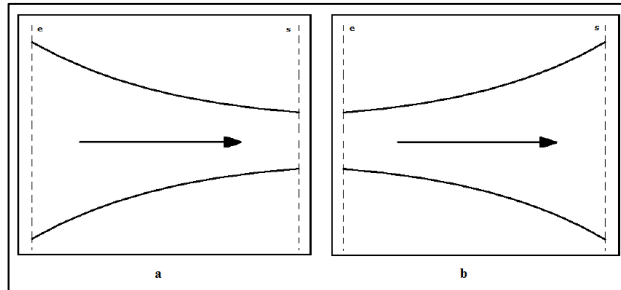
La tobera convergente tiene uso en vuelo a velocidad subsónica ($V < 1234$ km/h), esta velocidad es donde normalmente trascurren los vuelos comerciales, mientras que para vuelo a velocidad supersónica ($V > 1234$ km/h) se requiere de una tobera convergente-divergente.

Figura 8. Tobera Convergente



Fuente: ROLL ROYCE. *The Jet Engine*. 6 exhaust system. 1996. p. 60

Figura 9. Formas de tobera (a) convergente, (b) divergente.



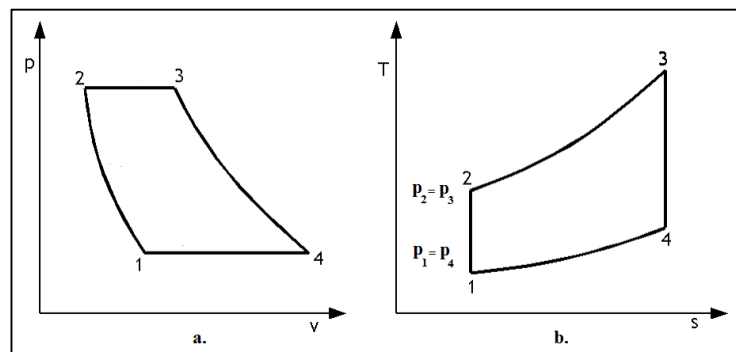
Fuente: SANCHEZ RAMOS, Jorge Alberto. Algoritmos de mejoramiento de las características de la turbina refrigerada. 2007. p.8

5.2 CICLO TERMODINÁMICO DE BRAYTON

El ciclo Brayton es la base de funcionamiento térmico del motor a reacción, consta de una etapa de compresión, una etapa de calentamiento y una expansión; en la fase de expansión ocurre que toda la energía cinética se usa para el movimiento de las turbinas y aprovechar la energía de la rotación, es un ciclo que está compuesto por cuatro procesos termodinámicos consta de un proceso de:

- compresión adiabática (1-2)
- calentamiento isobárico a presión constante (2-3)
- expansión adiabática (3-4)
- enfriamiento isobárico (4-1)

Gráfica 1. Ciclo de Brayton en función de a. Volumen (v) vs Presión (p) y b. Entropía(s) vs Temperatura (T)

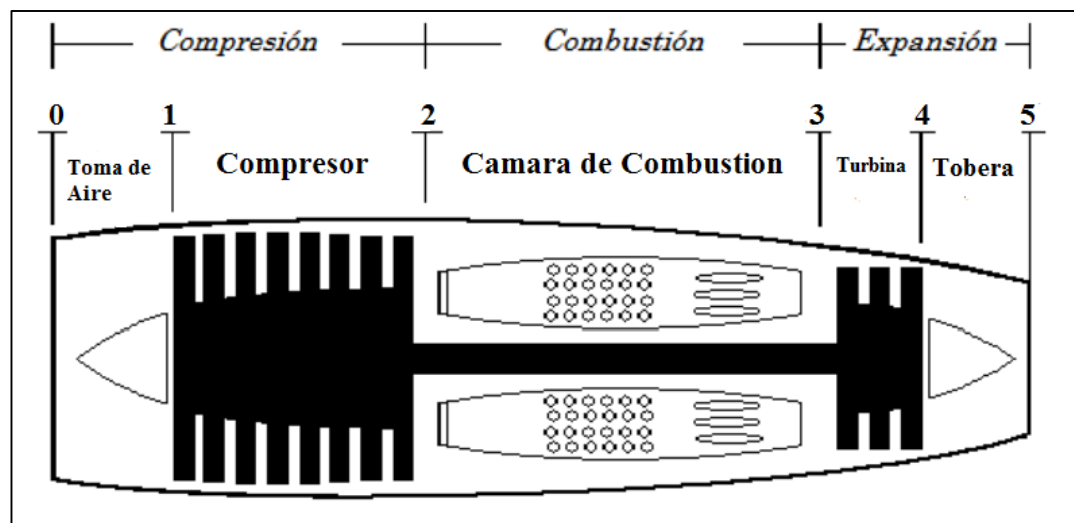


Fuente: Autor del proyecto

Las fases del ciclo termodinámico de Brayton para la propulsión aérea se podrían explicar así:

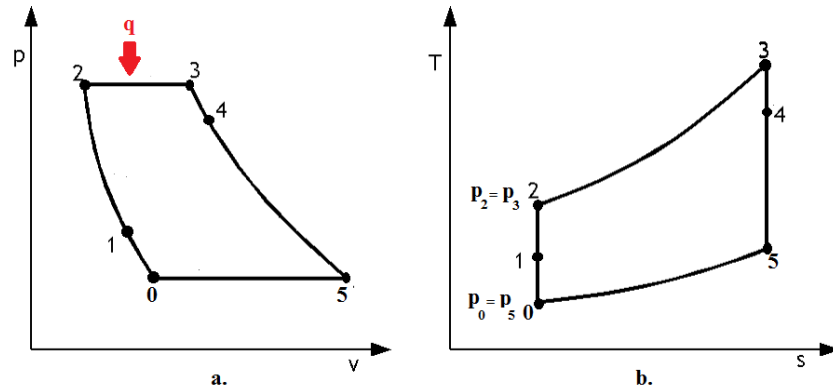
- 0-1. Entra el aire proveniente de la atmosfera hacía el motor debido al movimiento de la aeronave y que es aspirado de forma continua, comprimiendo el aire por el contacto motor/aire en la toma de aire.
- 1-2. Se comprime el aire por el movimiento del aire al compresor, mediante el trabajo mecánico de los compresores.
- 2-3. El aire comprimido llega a la cámara de combustión manteniéndose a presión constante teóricamente, combinándose el aire con el combustible y apareciendo el gas producto de la combustión aire/combustible.
- 3-4. El gas resultante de la cámara de combustión se expande en las turbinas, tomando la energía para mover el compresor o fan en los motores turboventilador.
- 4-5. El gas es expandido en la tobera de salida, donde se incrementa la velocidad del gas y este sale a la atmosfera.

Figura 10. Etapas del ciclo de Brayton en un motor a reaccion



Fuente: SANCHEZ RAMOS, Jorge Alberto. Algoritmos de mejoramiento de las características de la turbina refrigerada. 2007. p.15

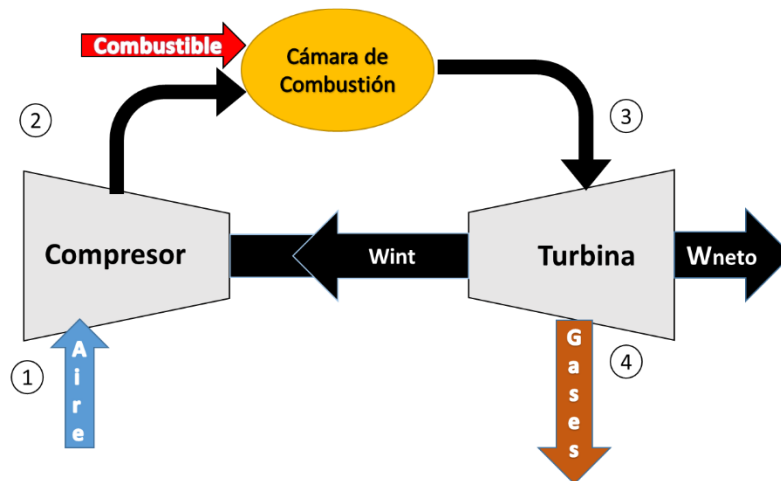
Gráfica 2. Ciclo de Brayton para motor a reacción en función de a. Volumen (v) vs Presión (p) y b. Entropía(s) vs Temperatura (T)



Fuente: Autor del proyecto

5.2.1 Ciclo Abierto de Brayton. El ciclo de Brayton para motores a reacción es un ciclo abierto como se aprecia en la figura 11. Entra aire fresco proveniente del ambiente el cual entra dentro del compresor donde la temperatura y presión aumentan. El aire que se encuentra ahora a alta presión sigue hacia la cámara de combustión donde se mezcla con el combustible y se quema a presión constante. Luego los generados en la cámara se encuentra a alta temperatura llegan a la turbina, allí se expanden y producen de este modo potencia. Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan hacia la atmosfera sin recircularse, es por ello que el ciclo de Brayton para turborreactores se considera como ciclo abierto.

Figura 11. Ciclo abierto de un motor a reacción



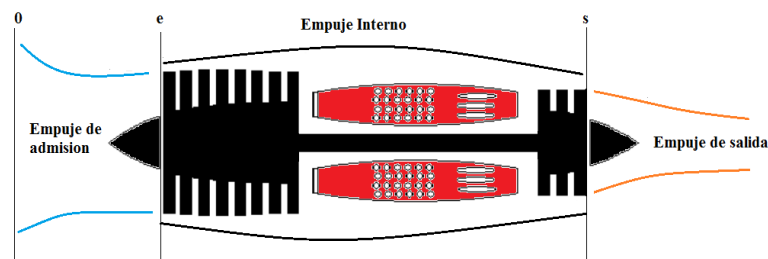
Fuente: Autor del proyecto

5.3 FUERZA DE EMPUJE.

La función de un motor en aviación es comunicar una fuerza de empuje a la aeronave, por ello en los motores aplica el principio de acción y reacción ya que el motor ejerce una fuerza sobre el gas que pasa por su interior y el gas ejerce una fuerza igual y contraria sobre las paredes del motor, dicha fuerza es el empuje que se transmite a la aeronave, el empuje se trasmite a la aeronave a través de los herrajes mecánicos que sujetan el motor al avión.

El empuje de un motor a reacción no se puede localizar en ningún punto exacto del motor, en todo momento se hace referencia al empuje que realiza en las diferentes etapas de operación del motor.

Figura 12. Etapas del empuje en un motor a reaccion



Fuente: SANCHEZ RAMOS, Jorge Alberto. Algoritmos de mejoramiento de las características de la turbina refrigerada. 2007. p.15; modificado por autor del proyecto.

5.3.1 Cálculo de empuje. La masa de un cuerpo por la velocidad que produce en un instante determinado se llama cantidad de movimiento, a partir de ello se puede escribir el empuje como:

$$\text{Empuje} = (\text{Gasto de aire}) \times (\text{Cambio de la velocidad del gas en el motor})$$

Ecuación 1. Ecuación general de empuje

$$E = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

Fuente: OÑATE, Antonio Esteban. Conocimientos del Avión. Paraninfo, Madrid: 2007. p.521

Donde:

\dot{m} = gasto másico de aire

V_2 = Velocidad final alcanzada por el gas a la salida del motor

V_1 = Velocidad inicial

Las unidades del flujo másico de aire \dot{m}_0 se expresa en peso por medio del sistema de medida métrico, ya que \dot{m}_0 es un peso se debe dividir por la gravedad de control g la cual se puede despreciar tomando el valor de gravedad como $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Además del aire que llega al motor también se debe tener en cuenta el combustible, dicho combustible también con cierta masa \dot{m}_f en la cámara de combustión; se tiene entonces la ecuación del empuje así:

Ecuación 2. Ecuación de empuje para motor a reacción

$$E = (\dot{m}_0 + \dot{m}_f)V_e - \dot{m}_0 V_0$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.20

Donde:

\dot{m}_0 = Flujo másico de aire en peso que absorbe el motor (kg/s)

\dot{m}_f = Flujo másico de combustible (kg/s)

V_e = Velocidad de salida de los gases por la tobera (m/s)

V_0 = Velocidad de entrada del aire (m/s)

E = Empuje

Esta ecuación permite calcular el empuje del motor a reacción conociendo la velocidad de salida de los gases V_e , el gasto de aire del motor \dot{m}_0 , el gasto de combustible \dot{m}_f y la velocidad del aire en el motor V_0 .

En la aplicación real el gasto de combustible del motor a reacción es muy pequeña comparado con el gasto de aire, si se desprecia el gasto de combustible \dot{m}_f de la ecuación se tiene que

$$E = \dot{m}_0(V_e - V_0)$$

Cuando la aeronave se encuentra en tierra, la velocidad de entrada de aire mínima tomando como referencia que la velocidad del aire es casi igual a cero $V_0 = 0$; la ecuación de empuje quedaría así:

$$E = \dot{m}_0 V_e$$

5.3.2 Presión gases en la tobera de salida. La relación de presión actúa entre la entrada y la salida de la tobera, luego de que el gas salga de las turbinas. Se puede generar un mayor empuje, cuanto mayor sea la relación de presión, mayor velocidad puede tomar el gas.

Si la velocidad del gas es subsónica se puede calcular con la misma ecuación 2, pero si la presión de descarga es mayor de la atmosfera el empuje se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Empuje con diferencia de presiones

$$E = (\dot{m}_0 + \dot{m}_f)Ve - \dot{m}_0V_0 + (P_e - P_0)A_e$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.20

Donde los términos significan lo mismo en la ecuación 2 y los términos adicionales son:

P_0 = presión estática ambiente

P_e = presión del gas a la salida de la tobera

A_e =Área de la tobera de salida

5.3.3 Empuje Específico. Es la relación en un motor a reacción que consume una cantidad de kilogramos G de aire en peso por segundo (kg/s) y produce una cantidad de empuje E en kilogramos. Donde I será el empuje específico.

$$I = \frac{\dot{m}_0}{\dot{m}_e}$$

El empuje específico determina la calidad del motor debido a que mide la variación de cantidad de movimiento que se suministra a cada kilogramo de aire que pasa sobre sí mismo. Combinando con la ecuación general de empuje resulta:

Ecuación 4. Empuje Específico

$$I = (V_e - V_0)$$

Fuente: OÑATE, Antonio Esteban. Conocimientos del Avión. Paraninfo, Madrid: 2007. p.521

5.3.4 Consumo específico de combustible. Es la cantidad de combustible que requiere un motor por hora para producir el empuje, su unidad son los kilogramos de combustible por hora/ kilogramos de empuje.

Se dice que un consumo específico de 0,3 (kg/hora)/kilogramos de empuje, definiría que el motor necesita 0,3 kilogramos de combustible por hora para producir 1 kilogramo de empuje.

A menor cantidad en número de consumo específico quiere decir que un avión determinado necesita repostar menos combustible a para un plan de vuelo determinado. El símbolo es TSFC (Thrust Specific Fuel Consumption).

Ecuación 5. Fórmula del consumo específico de combustible

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{T}$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.21

Donde:

$TSFC$ = Consumo específico de combustible

T = Empuje instalado en el motor (N)

5.3.5 Eficiencia de los motores a reacción.

5.3.5.1 Eficiencia térmica. Es el rendimiento que se efectuaría en la transformación de la energía del combustible en potencia mecánica y está dada en valores adimensionales en porcentajes.

$$Eficiencia\ Termica = \frac{Energia\ mecanica\ producida}{Combustible\ necesario\ para\ obtenerla}$$

Ecuación 6. Eficiencia térmica

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_s}{\dot{Q}_e}$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.26

Donde:

η_T = Eficiencia térmica del motor.

\dot{W}_s = Potencia neta a la salida del motor.

\dot{Q}_e = Rango de energía térmica liberada.

La potencia neta de salida del motor, tiene relación con el flujo másico de aire que entra, así como el flujo másico de combustible que se le inyecta al motor y con la velocidad de entrada a un motor determinado así como también la velocidad de salida, luego de atravesar el motor.

Ecuación 7. Trabajo neto a la salida del motor.

$$\dot{W}_s = \frac{1}{2}(\dot{m}_a + \dot{m}_f)V_s^2 - \dot{m}_0 V_a^2$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.26

Donde:

\dot{m}_a = Flujo másico de aire en peso que absorbe el motor. (Kg/s)

\dot{m}_f = Flujo másico de combustible en peso que se inyecta al motor según la actitud del vuelo (despegue, crucero y aterrizaje). (Kg/s)

V_s = Velocidad de salida de los gases por la tobera del motor. (m/s)

V_a = Velocidad de entrada del aire en el motor en metros por segundo (m/s) esta velocidad es la misma de la aeronave.

El rango de energía \dot{Q}_e se define como el producto entre el poder calorífico del tipo de combustible en uso Q_{netip} , este varía según el combustible usado, para el caso del presente proyecto, este es el factor que determinara que tan viable es o no usar biocombustible, debido a que el poder calorífico cambiara, según el bioqueroseno que se escoja.

Ecuación 8. Rango de energía térmica liberada

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_f Q_{netip}$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.26

Donde:

\dot{m}_f = Flujo másico de combustible en peso que se inyecta al motor en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)

Q_{netip} = Poder calorífico del combustible en uso (KJ/kg)

5.3.5.2 Eficiencia propulsiva. Es el rendimiento en el cual se realiza la transformación en el motor de la potencia mecánica en potencia de utilidad para un vuelo determinado y está dada en valores adimensionales de porcentaje.

$$\text{Eficiencia Propulsiva} = \frac{\text{Energía útil para el vuelo}}{\text{Energía mecánica producida}}$$

Ecuación 9. Eficiencia propulsiva

$$\eta_P = \frac{TV_0}{\dot{W}_s}$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.26

η_P = Eficiencia propulsiva del motor

T = Empuje del sistema propulsor (N)

V_0 = Velocidad de la aeronave (m/s)

\dot{W}_s = Potencia neta a la salida del motor (W)

Para el caso en que el flujo másico de combustible es mucho menor que el de aire las pérdidas son muy cortas, simplificando la ecuación de la eficiencia propulsiva se tiene:

$$\eta_P = \frac{2}{V_e/V_0 + 1}$$

5.3.5.3 Eficiencia motopropulsora. Es el producto del rendimiento termico y propulsivo. Viene determinado por la relacion entre la energía invertida en la propulsion y la energía comunicada cada kilogramo de combustible.

$$\text{Eficiencia global} = \frac{\text{Energía útil para el vuelo}}{\text{Combustible necesario para obtenerla}}$$

Ecuación 10. Eficiencia motorpropulsora

$$\eta_g = \frac{TV_0}{\dot{Q}_e}$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.28

5.3.5.4 Eficiencia global. El rendimiento global viene determinado por el producto de los rendimientos del motor y la propulsión.

Ecuación 11. Eficiencia global

$$\eta_g = \eta_t \eta_p$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.p.28

5.4 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La industria aeronáutica tiene un fuerte impacto en el medio ambiente generando contaminación acústica, partículas y gases que contribuyen al cambio climático; con el pasar de los años el tráfico aéreo se ha ido aumentando paulatinamente y con él las emisiones de gases efecto invernadero. Los contaminantes que se pueden producir son el óxido de carbono el cual resulta ser tóxico, óxidos de azufre que además de tóxicos son corrosivos, óxidos de nitrógeno tóxicos, partículas de humo los cuales influyen a la suciedad y también generan problemas de visibilidad, productos cancerígenos y aldehídos e hidrocarburos no quemados (irritantes y tóxicos).

5.4.1 Proceso de contaminación en motores a reacción. La reacción química en los motores se da en la cámara de combustión donde se transforma un hidrocarburo en dióxido de carbono y agua producto de la mezcla entre el queroseno y el aire; el dióxido de carbono existe en el medio ambiente pero un exceso afecta el equilibrio del medio ambiente.

Los efectos producidos por contaminación de parte de las operaciones aéreas en lugares apartados de los aeropuertos son de carácter secundario, mientras que en los aeropuertos y lugares aledaños se genera una contaminación alta y que afecta a las poblaciones circundantes a los aeropuertos; cuando hay condiciones cambiantes en las condiciones atmosféricas de los aeropuertos, las emisiones de los motores de las aeronaves afectan muy poco a la comunidad, por el contrario, si las condiciones del medio ambiente de los aeropuertos se mantiene estable por un largo tiempo los contaminantes sí pueden llegar a afectar a las poblaciones cercanas a los aeropuertos.

El diagrama ilustra el flujo de sustancias desde el aire y el combustible hacia un avión, y desde el avión hacia la atmósfera, clasificando estas sustancias en no contaminantes y contaminantes, y detallando sus impactos ambientales.

Entradas:

- AIRE:** Oxígeno, Nitrógeno, Trazas de otros gases.
- COMBUSTIBLE:** Hidrocarburos, Aditivos, Impurezas.

Avión: Representado como un elemento central que recibe las entradas y emite los contaminantes.

Clasificación de las emisiones:

- NO CONTAMINANTES (Químicamente inertes e invisibles):**
 - Anhídrido carbónico
 - Vapor de agua
- CONTAMINANTES (Químicamente reactivos y visibles):**
 - Oxidos de Nitrógeno
 - Hidrocarburos sin quemar
 - Humos
 - Oxidos sulfurosos
 - Monóxido de carbono
 - Resíduos de productos aditivos al combustible

Impactos Ambientales:

- NO CONTAMINANTES:** Ligeras modificaciones ambientales.
- CONTAMINANTES:**
 - Oxidos de Nitrógeno y Hidrocarburos sin quemar: Neblinas "smog".
 - Humos y Oxidos sulfurosos: Restricción de visibilidad. Acción destructiva de pinturas.
 - Monóxido de carbono y Resíduos de productos aditivos al combustible: Toxicidad.

La reacción química en los turborreactores genera en algunas etapas de la combustión excesos por ejemplo en la salida de la cámara de combustión, con un exceso de hasta 3 o 4 veces la cantidad necesaria para el proceso de combustión en sí, esto se da por la necesidad de mantener los álabes de la turbina por debajo de límites de la temperatura de los gases. Por razones de eficiencia en la combustión y en la mezcla de aire combustible y también para emergencias como apagado en altura y condiciones de reencendido de la cámara también en altura, es importante que la combustión se realice con una cantidad de aire próxima a la estequiométrica, lo que obliga a la separación de aire en dos flujos como se explicaba en el numeral 5.1.1.1 el flujo primario el cual entra a la cámara de combustión y el flujo secundario el cual rodea la cámara de combustión.

5.4.1.1 Dióxido de carbono. El dióxido de carbono o también anhídrido carbónico se forma en diferentes puntos como en la cámara de combustión en zonas de poco oxígeno y donde gases están a alta temperatura se forman las partículas de dióxido

de carbono esto se presenta en la parte central de la cámara de combustión cerca a los inyectores. El dióxido de carbono ayuda a absorber radiaciones de la parte exterior de la atmosfera, por tal motivo al haber una gran cantidad de este dióxido absorbiendo radiación externa y por tanto manteniendo dicha radiación en la atmosfera terrestre esta generara un aumento en la temperatura del planeta.

5.4.1.2 Óxidos de nitrógeno. En lugares donde se generan estos óxidos hay alta temperatura de combustión y bastante oxígeno como se ve en la Figura 13, por cada kilogramo de combustible quemado se forman cinco gramos o menos, siendo tóxicos y reaccionando en contra de la capa de ozono y aumentando la radiación ultravioleta.

5.4.1.3 Hidrocarburos no quemados. En zonas donde hay poco oxígeno pero en donde los gases se encuentran a baja temperatura se forma los aldehídos e hidrocarburos no quemados, dichos hidrocarburos pueden presentar efectos cancerígenos, presentándose el olor en el escape del turborreactor; se ubican cerca de las paredes del tubo de llamas refrigerado por el aire secundario; la luz del sol puede generar efectos en los hidrocarburos dando lugar al gas metano.

5.4.1.4 Humos. Se generan en diferentes puntos como en la cámara de combustión en zonas de poco en oxígeno y en que los gases están a alta temperatura, los primeros motores a reacción emitían una gran cantidad de humo, con el tiempo las cámaras de combustión se fueron mejorando con lo que se redujo el humo.

Debido a que en algunas etapas de vuelo, el combustible se quema de forma parcial, la parte restante se oxida dando lugar a contaminantes como el mencionado dióxido de carbono (CO), siendo este muy tóxico ya que disminuye el contenido de oxígeno en la sangre y también se presenta en forma de humo negro en el escape de los motores y algunas ocasiones partículas de carbón que generan humos muy intensos.

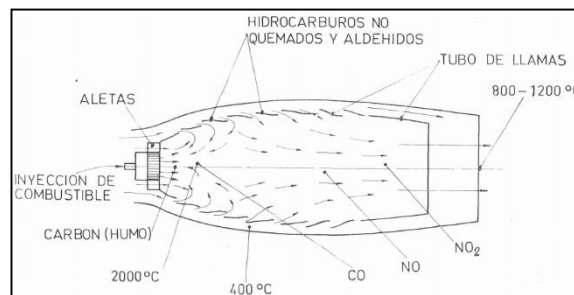
5.4.1.5 Óxidos de sulfuro. El azufre es generado directamente por el combustible, ya que todos los combustibles tienen azufre como impureza, este se expulsa por el escape del motor el cual se combina con el vapor de agua, dando lugar al ácido sulfúrico; en bajas alturas se disuelve fácilmente, pero en la estratosfera se forman sulfatos donde operan aviones supersónicos a gran altura.

5.4.1.6 Monóxido de carbono. Los motores de las aeronaves tienen una incidencia en las emisiones de monóxido en los aeropuertos y cercanías, pero en una menor medida comparada con las emisiones de los automóviles y los equipos de asistencia en tierra de las aeronaves, por tanto la concentración del monóxido en los

aeropuertos es prácticamente la misma que en las zonas urbanas alejadas de los aeropuertos con un bajo tráfico aéreo, mientras que en aeropuertos que sean hubs de operaciones si puede haber un aumento en dichas emisiones ya que el tráfico aéreo es mucho mayor.

5.4.1.7 Residuos de aditivos al combustible. Normalmente estos aditivos crean productos tóxicos, aunque los tóxicos son de una muy baja emisión, se debe tener en cuenta los residuos que se dejan, como ejemplo de ello está el plomo tetraetilo usado mejorar la capacidad antidetonante del combustible.

Figura 14. Zonas de formación de contaminantes



Fuente: SANCHEZ C. Contaminación atmosférica producida por turborreactores. 1970. Fig. 2

5.4.2 Emisión de contaminantes en actuaciones del motor a reacción. De los distintos tipos de contaminantes que se generan en los motores es importante saber en qué actuaciones de un vuelo se comienza a generar en los motores.

En regímenes bajos de empuje donde hay bajas revoluciones por minuto, la eficiencia de la combustión en la cámara de combustión es pequeña, allí la presión y la temperatura del aire que entra en la cámara de combustión es menor que en donde el empuje es alto, en regímenes de empuje bajo la combustión no es completa aquí es donde se comienzan a formar el óxido de carbono e hidrocarburos en esta fase de operación del motor, a esto también contribuye la mala distribución del combustible en la cámara.

Cuando el motor opera a altas revoluciones como despegue y ascenso, no hay emisión de monóxido de carbono ni hidrocarburos esto es gracias a que el rendimiento de combustión en la cámara es prácticamente del 100%, allí la eficiencia del combustible mejora y la cámara de combustión opera con presión y temperatura altas, en esta etapa de vuelo es donde se forman los óxidos de nitrógeno; la cantidad de óxidos aumentan con la temperatura de la llama y con el tiempo que dure el gas en la cámara.

5.4.3 Reducción de emisiones de contaminantes. Para reducir las emisiones de óxidos de carbono e hidrocarburos debido a las bajas revoluciones se podría:

- Aumentar el tiempo del gas en la zona de combustión, para de esta manera realizar el consumo total del queroseno y esto se puede lograr disminuyendo la velocidad del flujo en la cámara.
- Incrementar la temperatura en la zona de reacción con la medida exacta y así acelerar la reacción de combustión.
- Mejorar la atomización lo que ayudaría a la disminución del tamaño de las gotas y se consumirían en un menor tiempo.
- Mejorar la distribución del combustible evitando las bolsas de gas donde la mezcla es muy rica y hay combustible que no encuentra oxígeno suficiente.

Por otro lado para reducir los óxidos de nitrógeno se podría:

- Disminuir el tiempo del gas en la cámara y así impedir la formación de cantidades significativas de óxido, esto se logra aumentando la velocidad del flujo en la cámara.
- Que en la cámara de combustión hubiesen mezclas pobres de combustible y así reducir la temperatura de la llama y la velocidad de formación de estos óxidos.
- Mejorar la atomización y distribución del combustible para evitar la formación de zonas locales.

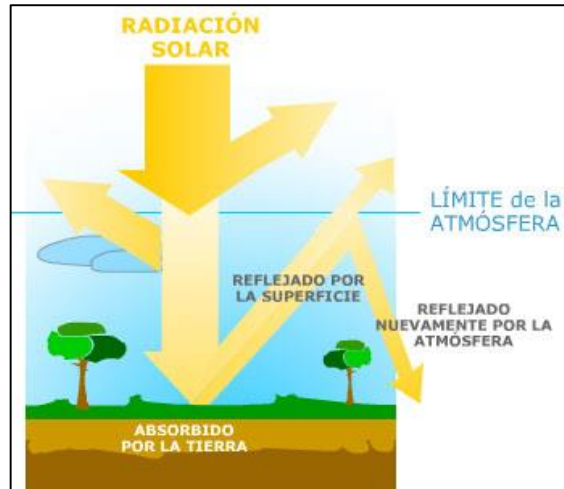
5.5 EFECTO INVERNADERO

El efecto invernadero es llamado así debido a que la temperatura del planeta va aumentando paulatinamente debido a existencia de gases en el aire que retienen parte de la energía de la radiación solar evitando su salida al exterior de la tierra, dichos gases transmiten el calor al resto de la atmósfera lo cual genera un aumento general de temperatura, este es un fenómeno similar al de un invernadero, ya que en un invernadero la temperatura es más alta que en el exterior porque entra más energía de la que sale dando lugar a su nombre por la similitud de un invernadero.

A mayor cantidad de gases efecto invernadero aumenta la cantidad de calor en el planeta ya que los gases pueden atrapar más calor, año tras año estos gases se han aumentado principalmente por las distintas industrias entre ellas la combustión de carbón, petróleo y gas natural los cuales liberan gases en estos combustibles de origen fósil y en los últimos años se ha aumentado mucho más.

Este efecto es esencial para la vida en la tierra, sin CO₂ ni vapor de agua la temperatura del planeta sería de -18°C haciendo poco viable la vida en la tierra.

Figura 15. Efecto invernadero



Fuente: Daniel R. Efecto invernadero. Disponible en:
www.exterior.pntic.mec.es/pvec0002/e_invernadero.htm

5.5.1 Gases efecto invernadero. Los gases efecto invernadero (GEI) son aquellos ayudan a generar el efecto invernadero los más importantes se encuentran en el medio ambiente naturalmente además de estos existen otros que son gases artificiales los cuales son producidos de distintas formas por la industria; los gases efecto invernadero son:

- Vapor de agua (H₂O)
- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido de nitrógeno (N₂O)
- Ozono (O₃)
- Clorofluorocarbonos (CFC)

5.5.1.1 Vapor de Agua (H₂O). Este gas se obtiene por evaporación del agua en estado líquido también puede ser por ebullición o sublimación del hielo; este es el gas que más contribuye al efecto invernadero esto es por causa de la absorción de rayos infrarrojos y no se puede percibir algún olor o color.

5.5.1.2 Dióxido de carbono (CO₂). También se conoce como óxido de carbono, gas carbónico o anhídrido carbónico, su principal fuente es el consumo de combustibles de origen fósil como petróleo, carbón y gas natural, con el desarrollo de la industria

de los automóviles y motores de combustión interna como los motores de aviación se aceleró el crecimiento de emisiones de dióxido de carbono, también se emite en las acerías, fundiciones y plantas de cemento debido a la continua quema de combustibles, la emisión del dióxido de carbono representan el 60% del efecto invernadero derivado de actividades humanas.

5.5.1.3 Metano (CH_4). Se genera principalmente de actividades agropecuarias pero también de la producción de gas natural y biogás, también la digestión del ganado y en menor tamaño los incendios forestales y la actividad de otros insectos, también se genera en los cultivos de arroz y en los depósitos de basura. El metano representa el 16% del efecto invernadero.

5.5.1.4 Óxido de Nitrógeno (N_2O). Este óxido es el resultado de combinar oxígeno y nitrógeno, el proceso de formación más común es la combustión a altas temperaturas como ocurre en los turborreactores y en los escapes de los carros, también proviene de las centrales energéticas que usan carbón.

5.5.1.5 Ozono (O_3). Está compuesta por tres átomos de oxígeno, aunque es sabido que la capa de ozono protege de rayos ultravioleta del sol esto es para el ozono en la estratosfera pero su acción en la parte baja de la atmósfera, ayuda al efecto invernadero. Se crea por la reacción de la luz solar hidrocarburos, óxidos o monóxido de carbono.

5.5.1.6 Clorofluorocarbonos (CFC). Es un gas conformado por cloro, flúor y carbono, es un gas no natural, creado totalmente en la industria y se fabrican para consumo como refrigerante, aerosoles, compuestos electrónicos, este gas contribuye notablemente a la descomposición de la capa de ozono y tiene una implicación de 14% en el efecto invernadero.

5.5.2 Forzamiento Radiactivo. Es cualquier cambio o alteración en el balance energético de un sistema climático, puede darse un forzamiento positivo el cual es cuando se tiende a calentar el sistema, mientras que un forzamiento negativo enfría el sistema climático, tomando como ejemplo la Tierra hay forzamiento radiactivo por un cambio en la radiación de parte del sol y/o principalmente por los efectos de las cantidades en gases efecto invernadero a la atmósfera.

La mayor fuente de energía que afecta al planeta llega del sol, la atmósfera absorbe esa energía y también la refleja; la energía absorbida produce calor, otra parte del calor se devuelve al espacio, el total de energía absorbida y regresada al espacio dando lugar a la temperatura promedio; el balance de radiación puede afectarse por varios factores como la reflexión de calor por medio de las nubes o gases efecto

invernadero, también por la cantidad de energía solar; cualquier alteración de este tipo es un agente de forzamiento radiactivo.

Este forzamiento radiactivo sucede continuamente por que los rayos solares que llegan a la atmosfera no son los mismos que salen ya que se forman nubes y también inciden diferentes gases en el medio ambiente.

5.6 TIPOS DE COMBUSTIBLES DE ORIGEN FÓSIL PARA MOTORES A REACCIÓN

Los combustibles usados en aviación son derivados del petróleo siendo hoy por hoy el queroseno el más usado en la actualidad en aviación civil y militar, es una pequeña fracción de petróleo denominado queroseno. El queroseno es obtenido al destilar el petroleo teniendo densidad intermedia entre la gasolina y el diésel, se utiliza como combustible, el JP (abreviatura de Jet Petrol) en los motores a reacción y de turbina de gas o bien se añade al gasóleo de automoción en las refinerías.

Se utiliza también como disolvente y para calefacción doméstica, como dieléctrico en procesos de mecanizado por descargas eléctricas y antiguamente, para iluminación. También se usan otras fuentes de combustibles, aunque en menor medida, como las arenas bituminosas, el gas natural condensado y las pizarras bituminosas.

5.6.1 Querosenos tipo Jet. Es el queroseno que se utiliza en la aviación civil existiendo tres tipos de estos combustibles: Jet A, Jet A-1 y Jet B.

5.6.1.1. Jet A. Se utiliza principalmente en Estados Unidos.

5.6.1.2. Jet A-1. Es el tipo de combustible más común siendo utilizado la mayoría de la aviación comercial es casi igual al Jet A, siendo su única diferencia la composición de aditivos, este queroseno tiene un punto de congelación de -47°C , haciéndolo adecuado para vuelos trasatlánticos, con un punto de inflamación de 38°C .

5.6.1.3. Jet B. Este combustible difiere del Jet A-1 en que combustiona más eficientemente en temperaturas muy bajas, haciéndolo muy útil en aeronaves que operan condiciones climáticas invernales.

5.6.2 Querosenos JP. Es el combustible utilizado para aviación militar, sus siglas traducen Jet Petrol, los que se utilizaron en un inicio fueron los JP4 y JP5 debido a sus propiedades de inflamabilidad se sustituyó por el JP8.

5.6.2.1 JP1, JP2 y JP3. Fueron los primeros combustibles militares para aeronaves con turborreactor, siendo un queroseno puro con muy alto grado de inflamación y con un punto de congelación de -60°C , los cuales fueron sustituidos uno tras otro debido a sus diversas limitaciones.

5.6.2.2 JP4. Fue el sustituto de los anteriores teniendo un gran uso en la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF) hasta 1995, el JP4 era una mezcla de gasolina con queroseno, tenía un bajo punto de inflamación -18°C , tenía algunas desventajas como pérdidas por evaporación a grandes altitudes y el riesgo de incendio durante su manipulación.

5.6.2.3 JP5. Fue utilizado para aeronaves de marina que eran embarcados en portaviones, se usó para aeronaves cuyo punto de inflamación mínimo es de 60°C , teniendo varios aditivos como anticongelante antioxidante y anticorrosivo.

5.6.2.4 JP8. Es ampliamente utilizado en la actualidad por las fuerzas militares siendo fabricado a base de queroseno y teniendo propiedades muy similares al Jet A-1 usado en la aviación comercial, contiene aditivos anticongelantes, anticorrosivos y antioxidantes.

5.7 COMBUSTIBLES FÓSILES ALTERNATIVOS AL QUEROSENO

Existen otros combustibles fósiles, alternativos al queroseno, denominados de forma genérica combustibles sintéticos. Entre ellos podemos encontrar los siguientes:

- ULS. Combustible sintetizado a partir de petróleo en un proceso que reduce al mínimo su contenido en azufre.
- CTL. Combustible sintético procedente de procesos Fischer Tropsch a partir de carbón.
- GTL. Combustible sintético procedente de procesos Fischer Tropsch a partir de gas natural.
- Hidrógeno líquido (criogenizado): obtenido a partir de hidrocarburos, generalmente gas natural.

5.8 COMBUSTIBLES DE ORIGEN RENOVABLE - BIOCOMBUSTIBLES

Dentro de los combustibles de origen renovable es preciso distinguir entre los biocombustibles y el hidrógeno. Los primeros son combustibles líquidos que proceden de materiales biológicos no fosilizados, fundamentalmente plantas.

La gran diferencia de los combustibles de origen fósil junto con los de origen renovable es que los de origen renovable consumen el dióxido de carbono para su producción.

Figura 16. Ciclo de los biocombustibles



Fuente: Imagen disponible en:

www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/260/Combustibles_alternativos_aviacion_ES.pdf

5.8.1 Biomasa a Líquido. Conocido como BTL (Biomass To Liquid) por sus siglas en inglés, es un biocombustible sintetizado mediante el proceso Fischer-Tropsch (F-T) a partir de biomasa. Puede utilizarse cualquier biomasa, sólida o líquida, lo que permite utilizar residuos forestales o urbanos.

5.8.2 Bioqueroseno. Es un tipo de biocombustible que se obtiene a partir de aceites vegetales con las mismas características que el queroseno convencional y con bajo contenido en carbono; siendo una denominación general para un combustible obtenido a partir de fuentes renovables que puede ser utilizado en los motores de aviación bien como único componente o también en mezclas con el queroseno convencional como se realiza en la actualidad.

El objetivo final es obtener biocarburantes a partir de productos que no compitan con la tierra fértil necesaria para la producción de alimentos. Los candidatos ideales son materiales lignocelulósicos o lípidos procedentes de distintas especies de algas. Al momento actual estas variantes se encuentran en un estado poco más que embrionario. A corto plazo, la alternativa contemplada de manera universal es utilizar aceites vegetales.

Siendo apenas relevante la materia prima sobre las características del producto, los criterios de selección de las más apropiadas serán: disponibilidad, economía, sostenibilidad y bajo coste de producción.

Junto a las fuentes tradicionales, palma, soja, colza, se están analizando otros vegetales no aptos para el consumo humano y ofrecen aceptables rendimientos en suelos áridos o degradados los cuales son objeto de estudio en el presente proyecto

5.8.3 Bioetanol. A partir de fermentación de azúcares que puede asemejarse a la gasolina de aviación

5.9. CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

Según la materia prima y el procedimiento por los que se obtienen los biocombustibles se puede distinguir entre biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación

5.9.1 Biocombustibles de primera generación. Son obtenidos a partir de cultivos alimenticios o forrajeros tradicionales. El bioetanol se obtiene a partir de cultivos cuyo contenido principal es el azúcar, como caña de azúcar, maíz, remolacha azucarera, sorgo y yuca; el biodiesel se obtiene a partir de cultivos cuyo contenido principal es el aceite, como la colza, la palma aceitera, el babasú, el coco, el ricino o el aguacate.

5.9.2 Biocombustibles de segunda generación. Los biocombustibles de segunda generación están representados fundamentalmente por los denominados lignocelulósicos. En estos cultivos no sólo se aprovecha la semilla sino toda la planta para su fermentación y obtención de etanol, a través de procesos dirigidos por enzimas. Permite aprovechar residuos de los cultivos tradicionales mencionados anteriormente (independientemente de que la semilla se aproveche para biocombustible o para uso cosmético o alimentario) y permite el aprovechamiento adicional de otros cultivos como el mijo perenne y los residuos forestales.

Otro tipo de fuente de biocombustibles es el uso de desechos de la industria alimentaria y del sector servicios, como pueden ser las grasas y aceites de fritura

usados. Se consideran habitualmente como biocombustibles de segunda generación los cultivos no tradicionales como la *Jatropha curcas* o la camelina (*Camelina sativa*). La *Jatropha* produce una semilla de la que se obtiene aceite, al igual que la palma aceitera. Sin embargo no tiene uso alimentario (es tóxica) y sus exigencias reducidas en cuanto a fertilización, calidad del suelo y agua diferencian este cultivo de los cultivos de primera generación. Asimismo, la camelina se utiliza para producir aceites no comestibles, aunque genera un subproducto de alimentación animal.

5.9.3 Biocombustibles de tercera generación. Son los biocombustibles tecnológicamente más avanzados. Su materia prima son algas unicelulares de las que obtiene biodiesel mediante sintetización.

Por otro lado, el hidrógeno líquido (criogenizado) se obtiene a partir de la hidrólisis de agua pura mediante energía eléctrica. Su uso se está considerando seriamente como una alternativa aunque su desarrollo se plantea a muy largo plazo.

Finalmente, una alternativa a los combustibles líquidos en la que se está trabajando es la propulsión eléctrica mediante el uso de baterías, fundamentalmente pilas de hidrógeno, que obtienen la energía eléctrica mediante reacciones químicas o mediante la energía solar fotovoltaica, donde la energía de propulsión se obtiene a partir de células fotovoltaicas de silicio. El uso de esta tecnología también se plantea a largo plazo.

5.9.4 Biocombustibles de cuarta generación. Los biocombustibles son producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico (CO_2) o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles.

A diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados como insumo o para realizar alguna parte de los procesos, en la cuarta generación, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles.

Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, depende totalmente de la información genética de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes.

5.10 PROPIEDADES DE LOS BIOQUEROSENOS EN ESTUDIO

5.10.1 *Jatropha curcas*. Se le denomina Piñón en Colombia siendo una planta que crece en forma de arbusto y se da en la mayoría de países tropicales como América Central, Sudamérica, Sureste de Asia, India y África.

Es una planta que vive más de dos años (perenne) y alcanza su ciclo de madurez fisiológica entre el quinto y sexto año, extendiendo su vida productiva alrededor de 45 a 50 años. Crece rápidamente con una altura normal de 4 a 6 metros, usualmente puede alcanzar los 8 metros. El grosor del tronco es de 20 cm con crecimiento desde la base en distintas ramas.

Todas las partes de esta planta tienen propiedades significativas para el bienestar humano y el ambiente, pero el actual auge del cultivo del piñón radica en su capacidad de producir biocombustibles (aceite, bioqueroseno, biodiesel) así como la generación de energía renovable a partir de la torta obtenida en el proceso de extracción de aceite.

5.10.1.1 Condiciones climáticas para su producción. No requiere un tipo de suelo especial y se desarrolla normalmente en suelos áridos y semiáridos, esta planta crece casi en cualquier parte, incluso en las tierras arenosas y salinas, puede crecer en una ambiente lleno de piedras climáticamente, la *Jatropha curcas* se encuentra en los trópicos y subtrópicos.

Resiste normalmente el calor aunque también soporta bajas temperaturas y puede resistir hasta una escarcha ligera. Su requerimiento de agua es sumamente bajo y puede soportar períodos largos de sequedad. Habita en campos abiertos, como en parcelas nuevas no es susceptible a inundaciones pero se desarrolla mejor en suelos que filtren.

El fruto del Piñón es una cápsula drupácea y ovoide dando lugar a un aceite, tal aceite comparte características similares con el diésel, convirtiéndolo en una opción viable para sustituir al combustible fósil, después de la polinización se forma una fruta trilocular de forma elipsoidal. Inicialmente son de color verde y carnoso, pero al madurar van cambiando su color al amarillo, hasta volverse de color café oscuro o negro. Las cápsulas de los frutos son de 2.5 a 4 centímetros de largo por 2 centímetro de ancho, elipsoidales y lisas. La *Jatropha curcas* puede producir varias cosechas durante el año si la humedad de la tierra es buena y las temperaturas son suficientemente altas. El desarrollo del fruto necesita aproximadamente 90 días desde la floración hasta que madura la semilla.

Figura 17. Fruto y semilla de la jatropha curcas



Fuente: SNV-SERNA. Guía Técnica Ambiental para el cultivo de la Jatropha Curcas. 2012. p.18

5.10.1.2 Propiedades.

Tabla 1. Propiedades del aceite obtenido de la planta jatropha curcas

Propiedades Jatropha Curcas	
Gravedad específica	0.915
Punto de llamarada (°C)	250°C
Punto de destilación (°C)	296 °C
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	59.8 cs (0,598m ² /sec)
Poder calorífico (MJ/kg)	9,470 kcal/kg (40MJ/kg)
Punto de ebullición (°C)	8 °C
Punto de solidificación (°C)	2

Fuente: N.R.Chakraborty, S C Sarkar. Development of a biofuel lamp and its comparison with a kerosene lamp. 2008

5.10.2 Camelina Sativa. La camelina es una planta de rústica y fácilmente adaptable, es una especie originaria de Europa del Norte y Asia central, es una planta prometedora para su uso como biocombustible debido a su composición de ácidos grasos en el aceite el cual se extrae de la semilla representando una solución que es sostenible y que puede ser viable en el largo plazo para la industria aeronáutica.

Su aceite vegetal se puede emplear en la producción de biocombustibles para el sector automoción como es el biodiesel y para aviación como el bioqueroseno. Se han realizado estudios en Estados Unidos los cuales apuntan a que la elaboración de biodiesel y bioqueroseno para aviación a partir de su semilla puede conseguir una reducción de emisiones de CO₂ superior al 80%.

Este aceite ya se ha comercializado en los Estados Unidos para producción como biocombustible, el cual permite realizar mezclas junto con el queroseno convencional (Jet A-1) dando lugar a un bioqueroseno que ayuda al impacto medio ambiental sin necesidad de realizar cambios a los motores de las aeronaves comerciales.

“Un ejemplo de su utilidad en la industria aeronáutica se registró en vuelos de demostración a nivel civil con un vuelo de KLM en noviembre de 2009 e IBERIA en un Airbus A320 en octubre de 2011 y demostración militar en vuelo de la U.S. Navy en abril de 2010”¹¹.

5.10.2.1 Condiciones climáticas para su producción. La camelina es una planta que crece anualmente y tiene capacidad de producción tanto en invierno como en verano teniendo un mejor desarrollo en climas templados y no crece muy bien por encima de 25°C, que se puede producir en zonas con baja precipitación ya que posee una gran resistencia a la sequía y heladas y no tiene tantas necesidades al momento de su producción.

Tiene varios atributos positivos entre ellos está que requiere de bajos insumos, fertilizantes y pesticidas. Posee un ciclo de cultivo corto (85-100 días) si se siembra en primavera; en cambio sí se siembra en invierno el ciclo se puede extender a 200 días aproximadamente; crece bien en regiones semiáridas y en suelos de baja fertilidad o salinos. En los últimos años, la producción de camelina se ha incrementado en el mundo debido a las grandes prestaciones que tiene esta el aceite de esta planta para su uso como biocombustible.

La planta mide entre 30 y 120 cm de altura, tiene hojas y su fruto es una pequeña silicua que alberga entre 8 y 15 semillas que poseen entre un 33 % y un 42 % de aceite. Las semillas son de pequeño tamaño. El peso de 1.000 semillas está entre 0,8 y 2 gramos.

Figura 18. Camelina sativa en clima templado



Fuente: OSSA BASAÑES, Federico José. Cultivos energéticos para biocombustibles.

¹¹ GUTIERREZ LOPEZ, Miguel y ALBALAT Antonio. El cultivo de la camelina en Aragon.2013. p. 2

Figura 19. Semilla de la camelina sativa



Fuente: AMÉDÉE Masclef - Atlas des plantes de France. Disponible en: es.wikipedia.org/wiki/Camelina_sativa#/media/File:36_Camelina_sativa_Fries.jpg

5.10.2.2 Propiedades.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la planta de camelina

Propiedades Camelina Sativa		
Gravedad específica		0.889
Punto de llamarada	(°C)	245
Punto de destilación	(°C)	291
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)		4,3395
Poder calorífico	(MJ/kg)	40
Punto de ebullición	(°C)	6
Punto de solidificación	(°C)	-5

Fuente: LLAMAS, Alberto. AL-LAL Ana María. HERNANDEZ, Miguel. LAPUERTA, Magín. CANOIRA Laureano. Biokerosene from Babassu and Camelina Oils.

5.10.3 Microalgas. Las microalgas son organismos unicelulares microscópicos y se pueden caracterizar según su color, ciclo de vida y estructura celular; el uso de microalgas para la producción de biodiesel se ha dado como una opción bastante viable y competente debido a que presentan mayor eficiencia fotosintética, son más eficaces en la asimilación de CO₂ y otros nutrientes con respecto a la gran mayoría de plantas de segunda generación, además de que no es necesario de tierras cultivables que compitan con agricultura para fines alimentarios, demandan menor consumo de agua renovable y pueden cultivarse en agua salobre.

La composición del medio de cultivo y las condiciones de crecimiento de microalgas tienen un efecto importante en el rendimiento de biomasa y en el contenido de lípidos, para su cultivo existen dos principales tipos de sistemas: sistemas cerrados y sistemas abiertos tipo raceway. Los sistemas abiertos presentan menor productividad comparados con los sistemas cerrados pero es más económico la operación, limpieza, construcción y escalabilidad a comparación de los sistemas cerrados; estos sistemas pueden ser iluminados por luz artificial, solar o ambas, los sistemas cerrados permiten tener mayor control sobre las condiciones de cultivo que los sistemas abiertos, y se ha demostrado que se han obtenido mayores productividades de biomasa al mismo tiempo que se previenen agentes contaminantes pero son pocos los sistemas cerrados que pueden emplear la energía solar eficientemente para la producción de biomasa.

Los principales sistemas de cultivo cerrados son: columnas de burbujas, tanques agitados, fotobiorreactores cónicos, tubulares y helicoidales; generalmente los fotobiorreactores operados a nivel laboratorio son iluminados artificialmente de manera interna o externa por lámparas fluorescentes o distribuidores de luz. El fotobiorreactor tubular es uno de los sistemas más adecuados para cultivos al aire libre entre las principales ventajas que presentan estos sistemas son un buen mezclado con bajo esfuerzo de corte, es fácil de esterilizar, aclimatación sencilla, es adecuado para inmovilización algal.

Figura 20. Sistema de cultivo de microalgas abierto (tipo raceway)



Fuente: CASTILHO, Iván. 2011. Design of a race-way open pond commonly used for algal culture.

Figura 21. Sistema de cultivo de microalgas Cerrado



Fuente: IGV, Biotech. 2013. Photobioreactor from glass tubes. Disponible en: en.wikipedia.org/wiki/Algae_fuel

5.10.3.1 Condiciones Climáticas para su producción. Una gran ventaja de este tipo de cultivo es que se puede realizar en áreas sumergidas, tierras infértiles e incluso con agua de mar. Este cultivo aparte de proveer materia prima de biocombustibles, tiene un impacto ambiental favorable al reducir la concentración de gases de efecto invernadero, debido a que utiliza grandes cantidades de CO₂ durante su cultivo

Varias especies de microalgas crecen con fuentes orgánicas de carbono y en ausencia de una fuente lumínica así como también existen microalgas que utilizan la energía del sol para crecer, las cuales requieren únicamente compuestos inorgánicos como CO₂, sales, agua y una fuente de energía lumínica para su desarrollo.

5.10.3.2. Propiedades.

Tabla 3. Propiedades del cultivo de Microalgas

Propiedades Microalgas	
Gravedad específica	0.864
Punto de llamarada (°C)	65-115°C
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	5.2x10 ⁻⁴
Poder calorífico (MJ/kg)	41
Punto de solidificación (°C)	-12

Fuente: Internet. elodiebrans.wordpress.com/2013/09/04/biocombustibles-de-microalgas-ii/

5.10.4 Salicornia. La salicornia bigelovii es una planta que vive en ambiente salino (halofita), cuyo período de crecimiento se da entre 300 a 360 días originaria del desierto de Sonora, puede llevar a cabo su ciclo de vida a diversas concentraciones de sal como lo son costas, estuarios y suelos salinos del interior de los continentes; esta es una hierba que vive más de dos años (perenne) con tallos que poseen muchas ramas, succulentas, articuladas y algo leñosas en la base. Es una excelente fuente de proteínas y minerales y contiene un perfil de ácidos grasos muy beneficioso.

La planta presenta ramas que brotan del tallo principal, sin hojas articuladas y erectas, donde se generan entre cada entrenudo seis flores con sépalos verdes en dos grupos de tres flores, que producen un promedio de 2 a 3 semillas cada una, a partir de las semillas se obtiene aceite el cual puede ser comestible haciendo que pueda ser utilizado como alimento animal y que además puede destinarse para producción de biocombustible líquido el cual se ajusta a los estándares para que pueda mezclarse junto con el queroseno convencional y así generar el biocombustible

5.10.4.1 Condiciones climáticas para su producción. Su presencia se asocia principalmente al calor en climas secos donde prevalecen los suelos salinos y pudiéndose encontrar también en climas fríos, pero en menor cantidad.

Esta es una hierba con tallos que poseen muchas ramas. Es un cultivo rico en aceite que se cultiva en campos irrigados con agua salada y puede ser cosechado con maquinaria estándar, como cualquier otro cultivo como el trigo o el arroz. Su tolerancia a la salinidad hace factible su cultivo utilizando agua de mar para el riego en regiones costeras y/o desérticas que anteriormente han sido consideradas no aptas para otros cultivos, permitiendo desarrollar áreas costeras desde Buenos Aires hasta Tierra del Fuego.

Las semillas de la salicornia se pueden prensar mediante procesos similares a los utilizados para otras cosechas de semillas aceitosas, como por ejemplo las semillas de girasol.

Figura 22. Planta salicornia



Fuente: FALASCA, Silvia. Salicornia, una especie promisoría para bioenergía en suelos salinos.

5.10.5 Aceite de cocina usado. Este aceite se puede emplear como biocombustible, pero debido a su alto nivel de viscosidad, previamente debe someterse a un proceso químico llamado o transesterificación; este aceite puede utilizarse bajo determinados porcentajes combinándolo con el queroseno normal, y así usarse como bioqueroseno sin hacer cambios en la mecánica de la aeronave.

Esta opción como biocombustible se ha desarrollado debido a la gran cantidad de desechos de aceite usado que se puede encontrar desde restaurantes hasta los diferentes hogares de familia, convirtiéndolo en una opción potencial para ser usado como bioqueroseno, hay que tomar en cuenta que el aceite usado en la actualidad no se le da un adecuado manejo y no tiene ningún tipo de norma para ser reciclado siendo desechado a través de los conductos de agua o vertiéndolo en el suelo, generando contaminación, siendo perjudicial para el medio ambiente y la salud humana y del mismo modo desperdiciando el aceite que podría reutilizarse como fuente renovable .

5.10.5.1 Etapas para la obtención de biocombustible mediante aceite vegetal usado:

- Filtrado aceite usado. Primero se debe filtrar el aceite para apartar desechos eliminando restos sólidos provenientes de las frituras; el aceite tiene un proceso de decantación por un período no menor a 24 horas y posterior secado a 110°C durante 50 minutos para eliminar el agua presente.
- Transesterificación. Cuando el aceite se encuentra en óptimas condiciones, se envía al reactor donde se produce la reacción química de transesterificación. En la misma reacciona el aceite con el metóxido, a una temperatura de 65 °C. La presión a la cual se realiza la reacción es la atmosférica. Es la principal etapa debido a que se produce la transformación de los triglicéridos en metil-esteres.

Allí, mediante un sistema de agitación de paletas se mezclan los litros de aceite con litros adecuados de metanol en presencia de un catalizador, obteniendo el biocombustible proveniente del aceite.

- Neutralización. Se produce el agregado de ácido sulfúrico para neutralizar la alcalinidad obtenida por el producto por el agregado de soda cáustica, paso realizado previo a la decantación.
- Decantación. Para extraer el subproducto se realiza una decantación por un período no menor a 8 horas. A partir de la diferencia de densidad, se obtiene una corriente pesada que contiene glicerina con impurezas y otra liviana el cual es el biocombustible con impurezas. La presencia de alcohol en ambas fases puede dificultar la separación.
- Elaboración bioqueroseno. La última etapa en la elaboración de bioqueroseno consiste en un lavado con agua durante 60 minutos mediante un sistema de burbujeo para eliminar las impurezas que pueden quedar en el biodiesel, como ser glicerina, alcohol y jabones.

Para 1000 litros de bioqueroseno se requieren 2000 litros de agua. Se decanta el agua de lavado durante 8 horas como mínimo, se extrae y se seca el biodiesel a 110° C durante 30/40 minutos, para eliminar los restos de agua que pueda tener el producto final.

5.10.5.2 Propiedades.

Tabla 4. Propiedades de aceite de cocina usado

Propiedades Aceite de Cocina	
Gravedad específica	0,885
Punto de llamarada (°C)	170,67
Punto de destilación (°C)	229
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	3,91950
Poder calorífico (MJ/kg)	46.91318
Punto de solidificación (°C)	5,5-23

Fuente: HERRERA RESTREPO Juan y VELEZ Julián. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible.

5.11 BIOCOMBUSTIBLES USADOS EN AVIACIÓN

En la industria aeronáutica se han ido implementando poco a poco los biocombustibles, inicialmente en motores estáticos seguidamente en vuelos de prueba y luego de varias pruebas y revisiones entre fabricantes de aeronaves, fabricantes de motores y compañías petroleras, se aprobaron los biocombustibles para uso en vuelos comerciales en 2011¹², desde entonces las compañías aéreas han experimentado con el uso de los biocombustibles en vuelos comerciales; la industria aeronáutica se ha enfocado principalmente en los biocombustibles de segunda generación ya que no compiten con los cultivos de alimentos para consumo humano.

El uso de biocombustibles en la aeronáutica es un gran medio para que la industria pueda disminuir sus emisiones de gases efecto invernadero, debido al aumento en vuelos es necesaria la utilización de biocombustibles como medida de disminución de emisiones; la industria aeronáutica es la responsable del 2% de las emisiones mundiales pero según como se prevé el crecimiento de la industria se espera que las emisiones aumenten a un 3%; es por ello que en la actualidad se están utilizando los biocombustibles¹³, los de mayor uso son los de segunda generación como jatropha, algas, camelina, babasú, salicornia, todos los vuelos realizados han sido en combinación con el queroseno convencional Jet A-1, dando lugar a los llamados bioquerosenos.

En la Tabla 5 se muestra el historial de vuelos realizados con bioquerosenos así como el tipo de bioqueroseno, fecha, aerolínea y motor utilizado en las pruebas; mientras que en la Tabla 6 se expone la misma información en vuelos comerciales con bioqueroseno.

¹² ASTM International. Norma sobre combustibles para aviación levanta vuelo. en Magazines & Newsletters// ASTM Standardization News 2011. Internet: http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO11/enright_sps011.html

¹³ SINC , La ciencia es noticia. La aeronáutica destina el 70% de sus innovaciones a la mejora ambiental: Internet: <http://www.agenciasinc.es/Noticias/La-aeronautica-destina-el-70-de-sus-innovaciones-a-la-mejora-ambiental>

5.11.1 Vuelos de prueba realizados con biocombustibles.

Tabla 5. Vuelos de prueba realizados con Biocombustibles

Fecha	Aeronave	Operador	Motor	Biocombustible	Descripción del biocombustible usado
Febrero 2008	Boeing 747-400	Virgin Atlantic	GE CF6-80C2B5F	Aceite de Babasú y Coco	Virgin realizó el primer vuelo de prueba de biocombustibles, el vuelo se realizó entre Londres y Ámsterdam utilizando una mezcla de 20% de biocombustible proveniente de aceite de babasu y coco y el 80% del queroseno convencional
Diciembre 2008	Boeing 747-400	Air New Zealand	Rolls Royce RB-211	Jatropha	Fue un vuelo de prueba de dos horas utilizando una mezcla de 50% jet-A1 y 50% Jatropha, Luego se retiró el motor para ser examinado y no se encontraron anomalías en el motor al usar este tipo de mezcla
Enero 2009	Boeing 737-800	Continental Airlines	CFM 56-7	Jatropha-Algas	Se realizó un vuelo experimental con un 50% de combustible para aviones y un 50% de una mezcla de bioquerosenos de algas y jatropha. El biocombustible fue elogiado por tener un punto de inflamación bajo y lo suficientemente bajo punto de congelación, temas que han sido un problema para otros biocombustibles
Enero 2009	Boeing 747-300	Japan Airlines	Pratt & Whitney JT9D-7R4G2	Camelina, Jatropha, Algas	La aerolínea realizó un vuelo experimental con un 50% de combustible para aviones y con un 50% de biocombustibles (camelina, jatropha y algas)
Marzo 2010	A-10 Thunderbolt	Fuerza aérea de estados unidos (USAF)	General Electric TF34-GE-100A	Camelina	La USAF llevó a cabo el primer vuelo de un avión con todos los Motores propulsados por una mezcla de biocombustible. El vuelo se realizó en la base Eglin uso una mezcla de 50% de JP-8 y 50% Camelina
Noviembre 2010	Airbus A320	TAM	CFM 56	Jatropha	El biocombustible utilizado para alimentar el A320 era una mezcla de 50 por ciento de queroseno de aviación convencional y de origen local a base de Jatropha bioqueroseno brasileño realizando un vuelo de prueba durante 45 minutos

Tabla 5. (Continuación)

Junio 2011	Boeign 747-8F	Boeing	General Electric GEnx-2B	Camelina	El vuelo realizado para el salón aeronáutico de Paris, usando en sus cuatro motores biocombustible derivado de la camelina en un 15% y el 85% restante derivado del queroseno convencional.
Junio 2011	Gulfstream G450	Honeywell	Rolls-Royce Tay 611-8	Camelina	Primer vuelo de prueba realizado con biocombustible, se utilizó un 50% de camelina y el 50% restante utilizando Queroseno estándar
Octubre 2011	Boeing 747-400	Air China	Pratt & Whitney PW4062	Jatropha	En este vuelo de prueba se utilizó Jatropha producida en China, dicho vuelo tuvo una duración de dos horas utilizando biocombustible en un 50% en uno de los motores de la aeronave
Noviembre 2011	Boeing 737-800	Continental Airlines	CFM 56-7 series	Algas	Continental voló con un biocombustible proveniente de algas, el combustible fue parcialmente derivado de algas genéticamente modificadas
Noviembre 2011	Boeing 737	Alaska Airlines	CFM 56-7 series CFM 56-3 Series	Aceite de cocina usado	Alaska airlines voló 75 vuelos utilizando como biocombustible aceite de cocina usado un 20% de este biocombustible en el itinerario de sus aeronaves en la flota del 737
Enero 2012	Boeing 777-300ER	Etihad Airways	General Electric GE90-115B1	Aceite de cocina usado	Esta aerolínea realizo un vuelo entre Seattle y Abu Dhabi utilizando combustible convencional y combustible basado en aceite vegetal de cocina usado
Octubre 2012	Dassault Falcon 20	Consejo Nacional de Investigación de Canadá(NRC)	General Electric CF700	Carinata	Este vuelo de prueba fue realizado en un 100% con biocombustible derivado de la carinata, siendo el primer avión civil en realizar un vuelo completo con biocombustible derivado de la carinata.

Fuente: Múltiples fuentes de información

5.11.2 Vuelos comerciales utilizando biocombustibles

Tabla 6. Vuelos Comerciales realizados con Biocombustibles

Fecha	Aeronave	Operador	Motor	Biocombustible	Descripción del biocombustible usado
Junio 2011	Boeing 747-800	KLM	CFM 56 7-Series	Aceite de cocina usado	Fue el primer vuelo comercial impulsado por biocombustible con 171 pasajeros a bordo, el vuelo se realizó desde Ámsterdam hasta París
Julio 2011	Airbus A321	Lufthansa	CFM 56 5-Series	Jatropha, Camelina y Aceite de origen Animal	Vuelo que se realizó entre Hamburgo y Frankfurt, utilizando bioqueroseno de diferentes fuentes ya que se realizaron vuelos durante 6 meses en ese mismo trayecto, se utilizó una mezcla de 25% de bioqueroseno y 75% del combustible tradicional
Julio 2011	Airbus A319	Finnair	CFM 56 5-Series	Aceite de cocina usado	Este vuelo comercial se realizó utilizando una mezcla con 50% Jet A1 y el otro 50% proveniente de aceite de cocina usado, vuelo que se realizó entre la ciudad de Ámsterdam a Helsinki, realizando periódicamente vuelos semanales con dicha mezcla
Julio 2011	Airbus A319	Interjet	CFM 56 5-Series	Jatropha	Primer vuelo comercial con biocombustible en América latina, se usó una mezcla de 27% de bioqueroseno proveniente de Jatropha y el resto del queroseno convencional, entre ciudad de México y Tuxtla Gutiérrez
Agosto 2011	Boeing 777-200	Aeroméxico	General Electric GE90-94B	Jatropha	Esta aerolínea realizó el primer vuelo comercial transatlántico con biocombustible, desde Ciudad de México a Madrid con 250 pasajeros a bordo, utilizando un 30% de bioqueroseno y el resto de queroseno convencional
Octubre 2011	Boeing 757-200	Thomson Airways	Roll-Royce RB 211	Aceite de cocina usado	Vuelo comercial realizado utilizando bioqueroseno en uno de los motores de esta aeronave, utilizando aceite vegetal de cocina usado

Tabla 6. (Continuación)

Marzo 2012	Airbus A320	LAN	CFM 56 5-Series	Aceite de cocina usado	Esta aerolínea realizó el primer vuelo comercial con biocombustible en Suramérica, el vuelo fue realizado entre Santiago de Chile y Concepción
Marzo 2013	Boeing 777-200ER	KLM	Pratt & Whitney PW4090	Aceite de cocina usado	KLM arranco el vuelo entre Nueva York y Ámsterdam, realizando 1 vuelo semanal con este biocombustible proveniente de aceite vegetal de cocina usado
Mayo 2014	Airbus A330-200	KLM	Rolls-Royce Trent 700	Aceite de cocina usado	Esta aerolínea realizó una serie de 20 vuelos utilizando bioqueroseno proveniente de aceite de cocina usado durante 6 meses. Estos vuelos tenían como itinerario las ciudades de Aruba y Ámsterdam, y se utilizó una mezcla de 20% de Bioqueroseno.
Agosto 2014	Airbus A320	LAN	CFM 56 5-Series	Camelina	Primer Vuelo Comercial en Colombia utilizando bioqueroseno, en este caso proveniente de la Camelina, en este vuelo se usó un 31% de Bioqueroseno Proveniente de la Camelina y el resto proveniente del Jet A1, el suministro del biocombustible fue con el apoyo de Terpel
Agosto 2014	Boeing 737-700	Gol transportes aéreos	CFM 56 7-Series	Aceite de Maíz, y Aceite de cocina usado	Esta aerolínea realizó 200 vuelos, durante el mundial utilizando bioqueroseno en 4% cambiando con el queroseno convencional (Jet A1)
Noviembre 2014	Boeing 737-600	Scandinavian Airlines	CFM 56 7-Series	Aceite de cocina usado	Esta aerolínea realizó un vuelo utilizando un 10% de este bioqueroseno, junto con el Jet A1.
Noviembre 2014	Boeing 737-600	Scandinavian Airlines	CFM 56 7-Series	Aceite de cocina usado	Una semana después esta aerolínea realizó otro vuelo comercial usando bioqueroseno está utilizando una mezcla del 48% de bioqueroseno y el restante de queroseno tradicional, desde las ciudades de Trondheim a Oslo en Noruega
Marzo 2015	Boeing 737-800	Hainana Airlines	CFM 56 7-Series	Aceite de cocina usado	China realizó su primer vuelo comercial con 150 pasajeros con bioqueroseno proveniente de aceite de cocina usado, una mezcla de 50% de bioqueroseno y el 50% restante de JET-A1

Fuente: Múltiples fuentes de información

5.12 NORMATIVA PARA BIOQUEROSENO

Para determinar cuál de los biocombustibles estudiados anteriormente es el más óptimo, es necesario saber bajo que normas se rigen los bioquerosenos en cuanto a los valores de sus propiedades como densidad, viscosidad y temperaturas a las cuales trabajaría un biocombustible óptimo para su uso en aeronáutica y con referencia de estos valores, saber cuál de los biocombustibles estudiados cuenta con las propiedades más atractivas para realizar los cálculos de eficiencia

5.12.1 Norma ASTM 1655 Queroseno Para Turbina de Aviación Civil. Especificación Americana normalizada para combustibles de turbina de aviación civil. Esta norma internacional incluye los requisitos de los combustibles comerciales de turbina de aviación para uso civil. No incluye a todos los combustibles avalados para motores alternativos de turbina de aviación, sino más bien, define los tipos específicos de combustible de aviación para uso civil: Jet A, y Jet A-1. Los combustibles deberán ser muestreados y probados adecuadamente para evaluar su conformidad con los requisitos detallados en cuanto a composición, volatilidad, fluidez, combustión, corrosión, estabilidad térmica, contaminantes y aditivos.

Tabla 7. Requerimientos de los combustibles para turbina de aviación de la norma ASTM 1655

Propiedad		JET A o JET A-1	Metodo ASTM
COMPOSICION			
Acidez Total mg KOH/g	máx	0,10	D3242
1. Aromaticos vol %	máx	25	D1319
2. Aromaticos vol %	máx	26,5	D6379
Azufre, mercaptano masa %	máx	0,003	D3227
Azufre, masa total	máx	0,30	D1266,D2622
VOLATILIDAD			
Temperatura de destilación	máx	205	D86, D2887
10% Recuperado, temperatura	máx	anotar	
50% Recuperado, temperatura		anotar	
90% Recuperado, temperatura		300	
Residuo de destilación %	máx	1,5	
Perdida destilación %	máx	1,5	
Punto de Inflamación °C	mín	38	D56 o D3828
Densidad (15°C), kg/m3		775 a 840	D1298 o D4052
FLUIDEZ			
Punto de Cristalización °C	máx	-40 JET A	D5972, D7153, D7154 o D2386
		-47 JET A-1	
Viscosidad -20°C,	máx	8	D445
COMBUSTION			
Poder neto de combustión PCI, MJ/kg	mín	42,8	D4529. D338 o D4809
Uno de los siguientes requisitos deberán ser cumplidos			
(1) Punto de Humo, mm, ó	mín	25	D1322
(2) Punto de Humo, mm, y	mín	18	D1323
naftalenos, vol, %	máx	3	D1840
CORROSION			
Tira de Cobre, 2hs a 100°C	máx	N° 1	D130
ESTABILIDAD TERMICA			
(2,5 hs a temperatura controlada de 260°C min)			
Caída de presión de filtro, mm, Hg	máx	25	D3241
Depósitos en tubo menor a		3	
CONTAMINANTES			
Gomas existentes, mg/100mL	máx	7	D381, IP540
Microsoparmotor, M Rating			D3948
Sin aditivo de conductividad eléctrica	mín	85	
Con aditivo de conductividad eléctrica	mín	70	
ADITIVOS			
Conductividad eléctrica, pS/m		ver 5.2	

Fuente: KOSS Diego. Producción y propiedades del bioqueroseno a partir del aceite del palmiste.
Anexo II.

5.12.2 DEFSTAN 91-91: Combustibles Tipo Queroseno de aviación tipo JET A-1. Esta norma es para estandarizar combustibles de turbina de aviación, que la Aviación Civil del Reino Unido (CAA) ha acordado que esté bajo la autoridad del Director de Defensa del grupo de combustibles.

Especifica los requisitos de un grado de queroseno como combustible de turbina de aviación, para ser usado en motores de aviones de turbina de gas. El combustible citado en esta especificación deberá disponer de propiedades y rendimiento satisfactorio cuando se utilice en aviones apropiados o en motores operados por la Corona, o para los que el organismo CAA certifique; en la tabla 8 se muestra las especificaciones.

Tabla 8. Detalle de requerimientos de combustibles para turbina de aviación de la norma DEF STAN 91-91

Propiedad	Unidades	JET A-1	Metodo ASTM
Aspecto		Claro y Brillo	Visual
Color Saybolt		Anotar	D 156 / D 6045
Partículas	mg/l	máx 1,0	D 5452 / IP 423
Acidez total	mg KOH/g	máx 0,015	D 3242 / IP 354
Aromaticos			
aromaticos	% V/V	máx 25	D 1319 / IP 156
aromaticos	% V/V	máx 26,5	D 6379 / IP 436
Sulfuro, mercaptano masa	% m/m	máx 0,002	D 3227 / IP342
Sulfuro masa total	% m/m	máx 0,3	D 2622, D 4294 IP / 336
Componentes de refinería			
componentes hidroprocesados	% V/V	anotar	
componentes hidroprocesados severamente	% V/V	anotar	
Destilacion			
Punto inicial	°C	anotar	D 86 / IP 123
10% Recuperado, Temperatura	°C	máx 205,0	
50% Recuperado, Temperatura	°C	anotar	
90% Recuperado, Temperatura	°C	anotar	
Punto final	°C	máx 300,0	
Residuo	% V/V	máx 1,5	
Perdida	% V/V	máx 1,5	
Punto de Inflamación	°C	máx 38	IP 170
Densidad (15°C)	kg/m ³	775 a 840	D 4052 / IP 365
Punto de cristalización	°C	máx - 47,0	D 2386 / IP 71
Viscosidad -20 °C	mm ² /s	máx 8,000	D 445 / IP 71
Punto de humo			
Punto de humo, mm, ó	mm	máx 25	
Punto de humo, mm, y	mm	máx 18	
naftalenos	% V/V	3	D 1840
Calor de combustion	MJ/kg	minimo 42,8	
Corrosion al Cobre (2hs a 100°C)	Esc norma	minimo 1	D 130 / IP 154
Estabilidad Térmica (JFTOT)			D 3241 / IP 323
temperatura de ensayo	°C	minimo 260	
depósitos	Esc norma	máx < 3	
presion diferencial	mmHg	máx 25	
Gomas actuales	mm/100 ml	máx 7	IP 540
Tolerancia al agua: caracterisitca interfase	Esc norma	máx 1b	D 1094 / IP 28
Indice de separacion del agua	Esc norma	min 85	D 3948
Conductibvidad Termica	pS/m	50 a 450	D 2624 / IP 274
Lubricidad	mm	máx 0,85	D 5001

Fuente: KOSS Diego. Producción y propiedades del bioqueroseno a partir del aceite del palmiste.
Anexo III.

5.12.3 ASTM 7566 Combustible Alternativo para Turbina de Aviación Civil. En el 2009 aparece una nueva especificación fue desarrollada para combustibles de aviación. La especificación D7566 es una especificación para las características del queroseno sintético (SPK) mediante el proceso Fisher-Tropsch también conocido como FT-SPK, También contiene la especificación para una mezcla de combustible alternativo con combustible a base de petróleo convencional llamado bioqueroseno esta especificación permite una mezcla de máximo 50% de combustible alternativo con combustible de avión convencional.

Tabla 9. Requerimientos de los combustibles para turbina de aviación mezclados con 50% de biocombustible de la norma ASTM 7566

Propiedad		JET A o JET A-1	Metodo ASTM
COMPOSICION			
Acidez Total mg KOH/g	máx	0,10	D3242
1. Aromaticos vol %	máx	25	D1319
2. Aromaticos vol %	máx	26,5	D6379
Azufre, mercaptano masa %	máx	0,003	D3227
Azufre, masa total	máx	0,30	D1266, D2622
VOLATILIDAD			
Temperatura de destilación	máx	205	D86, D2887
10% Recuperado, temperatura	máx	anotar	
50% Recuperado, temperatura		anotar	
90% Recuperado, temperatura		300	
Residuo de destilación %	máx	1,5	
Perdida destilación %	máx	1,5	
Punto de Inflamación °C	mín	38	D56 o D3828
Densidad (15°C), kg/m3		775 a 840	D1298 o D4052
FLUIDEZ			
Punto de Cristalización °C	máx	-40 JET A	D5972, D7153, D7154 o D2386
		-47 JET A-1	
Viscosidad -20°C,	máx	8	D445
COMBUSTION			
Poder neto de combustión PCI, MJ/kg	mín	42,8	D4529, D338 o D4809
Uno de los siguientes requisitos deberán ser cumplidos			
(1) Punto de Humo, mm, ó	mín	25	D1322
(2) Punto de Humo, mm, y	mín	18	D1323
naftalenos, vol, %	máx	3	D1840
CORROSION			
Tira de Cobre, 2hs a 100°C	máx	Nº 1	D130
ESTABILIDAD TERMICA			
(2,5 hs a temperatura controlada de 260°C min)			
Caída de presión de filtro, mm, Hg	máx	25	D3241
Depósitos en tubo menor a		3	
CONTAMINANTES			
Gomas existentes, mg/100mL	máx	7	D381, IP540
Microscoparmotor, M Rating			D3948
Sin aditivo de conductividad eléctrica	mín	85	
Con aditivo de conductividad eléctrica	mín	70	
ADITIVOS			
Conductividad eléctrica, pS/m		ver 5.2	

Fuente: KINDER, James. Evaluation of bio-derived synthetic paraffinic kerosenes. Tabla 2.3

6. DETERMINACIÓN DEL BIOQUEROSENO Y MOTOR A REACCIÓN PARA CÁLCULO DE EFICIENCIA

Para la obtención de biocombustibles se debe tener en cuenta que algunos productos que se pueden usar para la obtención del mismo compiten con la tierra fértil necesaria para la producción de alimentos para la humanidad, como objetivo principal se busca obtener biocombustibles que no compitan con la producción de dichos alimentos. Los candidatos ideales son los que provienen de plantas como las de segunda generación, cuya diferencia fundamental de los combustibles de segunda generación con respecto a los de primera generación, es que se elaboran a partir de mejores procesos tecnológicos y materias primas no destinadas a la alimentación, se pueden cultivar en terrenos que no están destinados a la agricultura en algunos casos pueden ser sitios desérticos.

Los biocombustibles de segunda generación son renovables y sustentables que puede reemplazar al combustible de aviación tradicional. Actualmente se producen a partir de aceites derivados de especies como la *Jatropha*, la *Higuerilla*, las algas, camelina, aceite de cocina usado, otras plantas pero en menor medida y algunas plantas marinas. Tienen el potencial de producir grandes cantidades de un combustible alternativo, con una oferta diversificada sin depender de una sola fuente, lo que permitirá asegurar precios más estables para el crecimiento de la industria, estudios actuales muestran que el aceite usado de cocina puede ser una buena alternativa, teniendo un doble beneficio para el medio ambiente, ya que se le está dando un doble uso, generando beneficio para el ambiente, también algunos países ya se encuentran trabajando con biotecnología para producir biocombustibles a partir de la modificación de la estructura genética de las bacterias

En este proyecto se estudian los bioquerosenos de segunda generación que han tenido mayor utilización principalmente por no competir con la agricultura para alimentación en el país como se verá más adelante; los bioquerosenos en estudio son los siguientes: *Jatropha Curcas*, *Camelina Sativa*, Microalgas, y Aceite vegetal usado, de los cuales se determina uno de ellos para la realización del estudio de eficiencia, para escoger el bioqueroseno se verán aspectos como la capacidad de producción en el país, propiedades fisicoquímicas, forma de obtención, capacidad de producción en Colombia y poder calorífico similar al Jet A-1, en el Anexo 1 se puede ver el comparativo de estos 4 bioquerosenos para mayor facilidad al momento de escoger el bioqueroseno más óptimo para realizar los cálculos de eficiencia.

6.1 JATROPHA CURCAS

En Colombia se conoce esta especie con el nombre de Piñón, es una planta que vive más de dos años y no requiere un tipo de suelo especial desarrollándose normalmente en suelos áridos y semiáridos; esta planta crece casi en cualquier parte, incluso en las tierras arenosas y salinas aunque soporte estos suelos si se vería disminuida su producción, también se puede dar en un ambiente lleno de piedras. Los suelos que hacen óptima la producción de la Jatropha son los trópicos y subtropicos haciendo esta especie apta para su producción y obtención en el país.

6.1.1 Producción a nivel mundial. En la actualidad según estudios en el mundo hay aproximadamente trece millones de hectáreas de Jatropha, siendo el país con mayor producción el Reino Unido donde se cuenta con aproximadamente trescientos mil hectáreas en la actualidad, en India se ha iniciado un proyecto donde hay destinadas trece millones de hectáreas en tierras marginales para su producción, proyecto que se inició en el año 2012. En china siembran treinta mil hectáreas en una provincia de ese país. En el país de las filipinas se tiene pensada una amplia inversión para plantaciones de la Jatropha mientras que en indonesia se establecieron cincuenta y dos plantas para la producción de biodiesel.¹⁴

En el continente africano se busca establecer alrededor de 321 mil hectáreas de Jatropha curcas en Senegal para reducción de la dependencia de los combustibles fósiles por parte de Etiopía se ubicaron un millón de hectáreas al cultivo y en otros países como Mali, Kenia y Burkina Faso la producción del cultivo se incrementa exponencialmente.

En Latinoamérica por parte de Ecuador hay doscientas cincuenta mil hectáreas en producción y en Brasil se establecieron ochocientas mil hectáreas para la obtención de biocombustible, en México hay más de dos millones de áreas potenciales para la producción pero solo están en gestión ciento setenta mil hectáreas; en Argentina Chile y Uruguay se encuentran en estudios las tierras aptas para la producción del cultivo

¹⁴ RUCOBA, Armando. MUNGUÍA, Alfonso. SARMIENTO, Francisco. Entre la Jatropha y la pobreza: reflexiones sobre la producción de agrocombustibles en tierras de temporal en Yucatán. Yucatán: 2012. Internet: <http://www.ciad.mx/archivos/revista-eletronica/RES41/ArmandoRucoba.pdf>

6.1.2 Producción en Colombia. Actualmente en el país la producción de la *Jatropha* tiene bastante potencial y es muy promisorio debido a que tiene características que le permiten desarrollarse en el país, una empresa estadounidense llamada SG biofuels dedicada a la producción de biocombustibles¹⁵, está implementando este cultivo en el país, suministrando tanto la semilla como todos los insumos necesarios para su producción a gran escala principalmente para utilizar el aceite como combustible aeronáutico, dando un paso muy importante.

Hoy en día aún se cultiva en pequeños campos para fines comerciales, donde se han realizado estudios de producción en diferentes zonas del país como se aprecia en la Figura 23 para ser cultivada en grandes extensiones, pero los estudios de esta planta son muy escasos en Colombia y hacen necesario seguir investigando sobre la planta ya que de entrada el país cuenta con la capacidad para poder llegar a producirlo como bioqueroseno en el país.

Figura 23. Lugares geográficos de Colombia para producción de *Jatropha*



Fuente: Autor del proyecto

¹⁵ PORTAFOLIO. Archivo - Colombia intentará con la *jatropha*, a pesar de que el fruto de este arbusto no es comestible. Bogotá. 2010. Internet: <http://www.portafolio.co/archivo/documento/CMS-7444393>

6.1.3 Propiedades Fisicoquímicas como Bioqueroseno.

Tabla 10. Propiedades de la Jatropha Curcas

Propiedades Jatropha Curcas	
Gravedad específica	0.915
Punto de llamarada (°C)	250
Punto de destilación (°C)	296
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	0,598
Poder calorífico (MJ/kg)	40
Punto de ebullición (°C)	8
Punto de solidificación (°C)	2
Aceite Producido (litros/Ha/Año)	1900

Fuente: N.R.Chakraborty. Development of a biofuel lamp and its comparison with a kerosene lamp.

6.1.4 Resultados en los motores. Los vuelos en los que se usó el biocombustible fueron vuelos realizados en diferentes partes del mundo, en la tabla 11. Se muestran los vuelos realizados con biocombustible así como el motor usado y el país de origen del bioqueroseno derivado de la Jatropha.

Los resultados fueron totalmente positivos ya que los motores que se utilizaron no presentaron anomalías en vuelo alguno¹⁶, lo cual quiere decir que el bioqueroseno proveniente de la Jatropha sí se puede usar en motores a reacción; además de que a los motores usados no se les realizó cambio alguno debido principalmente a que el bioqueroseno usado fue mezclado con el combustible Jet A-1 tradicional.

Tabla 11. Motores usando Bioqueroseno de Jatropha

Motor Utilizado	País/Continente
Rolls Royce RB-211	Nueva Zelanda/Oceanía
CFM 56-7 Series	Estados Unidos/ América
Pratt & Whitney JT9D-7R4G2	Japón/Asia
Pratt & Whitney PW4062	Brasil/ América
CFM 56 5-Series	México/ América
General Electric GE90-94B	México/ América

Fuente: Autor del Proyecto con base a tabla 5 y 6.

¹⁶ TENDENCIAS 21. Navegación aérea. El aceite de Jatropha se consolida como biocombustible para la aviación. Pruebas Positivas: 2010. Internet: http://www.tendencias21.net/El-aceite-de-Jatropha-se-consolida-como-biocombustible-para-la-aviacion_a4969.html

6.2 CAMELINA SATIVA

Es una planta que crece anualmente y tiene capacidad de producción tanto en invierno como en verano teniendo un mejor desarrollo en climas templados, esta planta no crece muy bien por encima de 25°C, entre sus ventajas esta que requiere bajos insumos, fertilizantes y demás productos tradicionales para cultivos, además de contar con una buena cantidad de aceite para producción como bioqueroseno.

6.2.1 Producción a nivel mundial. Este aceite ya se comercializa en los Estados Unidos para producción como biocombustible, el cual permite realizar mezclas junto con el queroseno convencional (Jet A-1), en Europa se lleva a cabo un megaproyecto para la producción de la camelina, llamado proyecto Itaka, el cual se trata de producir hasta 4000 toneladas de biocombustible; dicho proyecto está compuesto por los países que componen la Unión Europea, donde se quiere implementar toda la cadena de valor desde su obtención hasta su comercialización¹⁷.

A nivel mundial esta planta se puede encontrar de manera silvestre en todo el mundo, pero debido a las diferentes clases de la planta de camelina, no se puede utilizar cualquier tipo de planta silvestre para extraer su aceite como biocombustible, por tanto se deben estudiar dichos cultivos y verificar su calidad de aceite, por otra parte también se cultiva la camelina en países como china, india, suiza y en países africanos, en la mayoría de casos para producción de bioqueroseno o biodiesel.

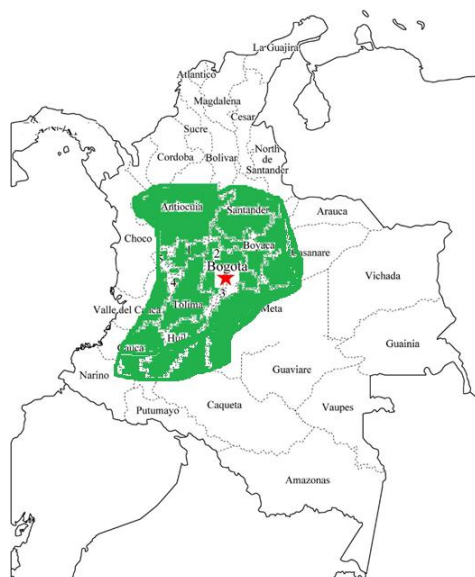
6.2.2 Producción en Colombia. En Colombia hay un gran potencial para la producción en grandes cantidades para la camelina, ya que cuenta con tierras aptas para la producción del mismo, así como excelente ubicación geográfica y clima, abriendo puertas importantes para los biocombustibles en el país.

La posibilidad de cultivar la Camelina Sativa en Colombia para proveer la demanda biocombustibles que se va a generar por parte de la industria de la aviación, plantea un reto importante el país, todo esto se vio potenciado gracias al vuelo comercial realizado en el año 2013 por parte de LAN donde se realizó un vuelo comercial con una mezcla entre el bioqueroseno proveniente de la camelina y el queroseno normal

¹⁷ SENASA. Noticias Lanzamiento de ITAKA: proyecto europeo para el uso de los biocombustibles sostenibles en aviación. 17 Dic. 2012. Internet: <http://www.senasa.es/portada.aspx?lang=es-ES&IDPagina=270>

vuelo que se hizo en un Airbus A320, en la ruta Bogotá-Cali¹⁸; en el país se han implementado cultivos de camelina en pequeñas cantidades, en la figura 24 se pueden apreciar los lugares más óptimos para producción de camelina en el país.

Figura 24. Lugares geográficos de Colombia para producción de camelina



Fuente: Autor del proyecto.

6.2.3 Propiedades fisicoquímicas como Bioqueroseno

Tabla 12. Propiedades de la camelina sativa

Propiedades Camelina Sativa	
Gravedad específica	0.889
Punto de llamarada (°C)	245
Punto de destilación (°C)	291
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	4,3395
Poder calorífico (MJ/kg)	40
Punto de ebullición (°C)	6
Punto de solidificación (°C)	-5
Aceite Producido (litros/Ha/Año)	580

Fuente: LLAMAS, Alberto. AL-LAL Ana María. HERNANDEZ, Miguel. LAPUERTA, Magín. CANOIRA Laureano. Biokerosene from Babassu and Camelina Oils.

¹⁸ LAN. Noticias, Comunicados de prensa - LAN realizó el primer vuelo comercial con biocombustible de segunda generación en Colombia. 21 Agosto 2013. Internet: http://www.lan.com/es_cl/sitio_personas/prensa/noticias-y-comunicados-de-prensa/comunicados-de-prensa/lan-realizo-el-primer-vuelo-comercial-con-biocombustible-de-segunda-generacion-en-colombia

6.2.4 Resultados en los motores. Con el biocombustible derivado del aceite de camelina se han realizado varios vuelos todos ellos en motores de aviación comercial como se muestra en la tabla, cabe destacar que al ser la camelina un bioqueroseno se puede mezclar con el queroseno tradicional y ser utilizado para la realización de diferentes vuelos¹⁹.

Tabla 13. Motores utilizando bioqueroseno de camelina

Motor Utilizado	Pais/Continente
Pratt & Whitney JT9D-7R4G2	Japon/Asia
General Electric TF34-GE-100A	Estados Unidos/ América
General Electric GEnx-2B	Paris/ Europa
Rolls-Royce Tay 611-8	Estados Unidos/ América
CFM 56 5-Series	Alemania/Europa
CFM 56 5-Series	Colombia/ América

Fuente: Autor del Proyecto con base en Tablas 5 y 6.

6.3 MICROALGAS

El uso de microalgas es una opción bastante viable y competente debido a que presentan mayor eficiencia fotosintética, son más eficaces en la asimilación de CO₂ demandan menor consumo de agua renovable y pueden cultivarse en agua salobre requieren de luz que puede ser solar o artificial²⁰. Una gran ventaja de este tipo de cultivo con respecto a la camelina y la Jatropha es que se puede cultivar en áreas sumergidas, tierras infértiles e incluso con agua de mar, por tanto no compite con ningún terreno ni con hectáreas naturales, así mismo la cantidad de aceite producido es mucho mayor que la de Jatropha y Camelina juntas.

6.3.1 Producción a nivel mundial. En el mundo se están implementando este tipo de cultivo algal, como excelente fuente para producción de biocombustible, una de sus características más atractivas es la cantidad de aceite que produce; por otra parte una gran desventaja es el costo de producción de tipo de cultivos, en el mundo los principales productores de algas son Estados Unidos, Francia y Brasil, también se han creado este tipo de cultivos en Argentina y México.

¹⁹ REPSOL. Sala de prensa - Biocombustibles para volar más limpio. Primer vuelo español con bioqueroseno. Agosto 2012. Internet: http://www.repsol.com/es_es/corporacion/prensa/Newsletter/Biocombustibles-mas-limpio.aspx

²⁰ Ibid., Microalgas: la nueva generación de biocombustible.

6.3.2 Producción en Colombia. Colombia es uno de los pioneros en Suramérica en el estudio de la microalgas como fuente de biocombustible, se han realizado investigaciones en el país desde el año 2008, llevando a cabo avances para poder producirlo en gran escala, además que este cultivo no requiere de tierras específicas para su producción, en La Guajira desde el año 2013 se crearon cultivos de microalgas expuestos al aire tipo raceway, debido a las características climatológicas excelentes y amplia iluminación solar para la producción de biocombustibles²¹, además de la Guajira el país cuenta con otras ciudades que cuentan con la características adecuadas para la producción, como en Bolívar, Córdoba, Huila, Antioquia y Valle del Cauca, departamentos todos donde se llevan a cabo estudios conjuntos para determinar cuál es el más óptimo para cultivar en el país.

6.3.3 Propiedades Fisicoquímicas como bioqueroseno.

Tabla 14. Propiedades de las microalgas

Propiedades Microalgas	
Gravedad específica	0.864
Punto de llamarada (°C)	65-115°C
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	5.2x10 ⁻⁴
Poder calorífico (MJ/kg)	41
Punto de solidificación (°C)	-12
Aceite Producido	9000-32000

Fuente: BRANS, Elodie. 2013 Biocombustibles de microalgas II

6.3.4 Resultados en motores. Son muy pocos los vuelos realizados con bioqueroseno proveniente de las microalgas, en primer lugar porque es mucho más costoso producirlo comparado con cultivos como la camelina o la jatropha, sin embargo los vuelos que se realizaron con este bioqueroseno han sido positivos y demostrando que las algas son un biocombustible que para el mediano plazo, podría llegar a ser el de mayor producción, esto por la gran cantidad de aceite generado comparado con las otras opciones que hay en la actualidad para producir

²¹ COLORADO, Mario. MORENO, Diego. PEREZ, Jésica. Desarrollo, producción y beneficio ambiental de producción de microalgas. La experiencia en La Guajira, Colombia. Junio 2013. Internet: <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/ambienteydesarrollo/article/view/6049/5011>

combustible renovable, sin embargo su alto valor de producción hoy por hoy no permitiría una rentabilidad para su uso.

Tabla 15.Motores utilizando bioqueroseno de microalgas

Motor Utilizado	Pais/Continente
CFM 56-7 series	Estados Unidos/ Norteamerica
CFM 56-7	Estados Unidos/ Norteamerica

Fuente: Autor del Proyecto con base en Tablas 5 y 6

6.4 ACEITE DE COCINA USADO

Este aceite se puede emplear como biocombustible, previamente sometido a proceso de transesterificación²²; puede utilizarse bajo determinados porcentajes combinándolo con el queroseno normal, y así usarse como bioqueroseno sin hacer cambios en la mecánica de la aeronave.

Esta opción como biocombustible se ha desarrollado debido a la gran cantidad de desechos de aceite usado que se puede encontrar desde restaurantes hasta los diferentes hogares de familia, convirtiéndolo en una opción potencial para ser usado como bioqueroseno.

6.4.1 Producción a nivel mundial. Actualmente en el mundo son muy pocos los países que tienen una normativa para el correcto reciclaje del aceite usado para ser reutilizado como bioqueroseno o biodiesel, en Dubái se está implementando un proyecto para utilizar este aceite como biocombustible, siendo este el primer proyecto donde hay una normativa para el correcto manejo de los aceites usados y así reutilizarlos como biocombustibles; debido a la gran cantidad de aceite requerido, en este país se utilizara aceite de casas residenciales y de restaurantes donde el uso de este aceite tiene amplia utilización; también en Austria se establece un proyecto de producción de biocombustible a partir de aceites utilizados también de la cadena de restaurantes McDonald`s, donde la misma cadena de restaurantes

²² HERRERA RESTREPO Juan y VELEZ Julián. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible. Trabajo de grado tecnólogo químico. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad Tecnología Química. 2008. p.13 internet:<<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1059/1/6626H565.pdf>>

se encarga de recolectarlo, en Estados Unidos también existe una normativa para reciclar aceite usado, el cual es una campaña de recolección que comenzó en La Florida y se expandió por Hawái y luego por todo el país, y el aceite se usa para mover vehículos militares y algunos vehículos oficiales; en Suramérica también hay países que ya se encuentran en camino a producción de biocombustible, los principales son Brasil, Argentina y Uruguay que ya están implementando este aceite como fuente de biocombustible²³.

6.4.2 Producción en Colombia. En el país actualmente el aceite usado no tiene un adecuado manejo y no tiene ningún tipo de norma para ser reciclado, aceite que podría reutilizarse como fuente renovable, el país aún se encuentra en estudios a nivel laboratorio y planes pilotos para poder llegar a ser una opción potencial para llegar a producirlo como biocombustible.

6.4.3 Propiedades Fisicoquímicas como Bioqueroseno.

Tabla 16. Propiedades aceite de cocina

Propiedades Aceite de Cocina	
Gravedad específica	0,885
Punto de llamarada (°C)	170,67
Punto de destilación (°C)	
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	3,9195
Poder calorífico (MJ/kg)	4.691.318
Punto de ebullición (°C)	
Punto de solidificación (°C)	
Aceite producido	Variable según recolección

Fuente: HERRERA RESTREPO Juan y VELEZ Julián. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible.

6.4.4 Resultados en los motores. Los vuelos realizados hasta la fecha con aceite de cocina, han arrojado resultados totalmente positivos, aunque según estudios es óptimo usar este aceite en mezcla con el combustible convencional, esto debido a que su uso como único combustible reduce la eficiencia en los motores, de igual manera todos los vuelos que se realizaron con este bioqueroseno fueron mezclados

²³ Ibid., p.14,15.

con el queroseno fósil convencional Jet A-1 hasta en un 50%, por lo cual los resultados fueron muy positivos; en la tabla 17 se puede ver el historial de motores que han usado este tipo de bioqueroseno, algunos de ellos en vuelos de prueba y otros en vuelos comerciales.

Tabla 17. Motores utilizando bioqueroseno de aceite usado.

Motor Utilizado	País/Continente
CFM 56-7 series	Estados Unidos/ Norteamérica
CFM 56-3 Series	Estados Unidos/ Norteamérica
General Electric GE90-115B1	Estados Unidos/ Norteamérica
CFM 56 7-Series	Holanda/Europa
CFM 56 5-Series	Alemania/Europa
Roll-Royce RB 211	Reino Unido/ Europa
CFM 56 5-Series	Chile/ Suramérica
Pratt & Whitney PW4090	Holanda/Europa
Rolls-Royce Trent 700	Holanda/Europa
CFM 56 7-Series	Brasil/Suramérica
CFM 56 7-Series	China/Asia

Fuente: Autor del Proyecto con base en Tablas 5 y 6.

6.5 MOTORES UTILIZADOS POR AEROLÍNEAS QUE OPERAN EN EL PAÍS

Para determinar cuál es el motor más usado en el país, se tiene presente principalmente las aerolíneas comerciales que operan en Colombia; también que el motor ya haya utilizado bioqueroseno y que no se hayan realizado cambios en el motor, esto para determinar si el motor sin cambios en sus sistemas opera de manera más eficiente con bioqueroseno o sin él.

Los cálculos que se realizan en este proyecto van encaminados hacia la aviación comercial a nivel nacional, por ende se tiene en cuenta tres aerolíneas principales en el país: Avianca, LAN y Viva Colombia.

6.5.1 Motores usados por Avianca. En la tabla 18 se puede ver su flota así como el motor que se utiliza por aeronave

Tabla 18. Flota actual de la aerolínea Avianca

Flota Avianca		
Aeronave	Unidades	Motor usado
Boeing 787	4	Rolls-Royce Trent 1000
Airbus A330	10	Rolls-Royce Trent 772B
Airbus A321	5	CFM 56 5-Series
Airbus A320	54	CFM 56 5-Series
Airbus A319	25	CFM 56 5-Series
Airbus A318	10	CFM 56 5-Series
Embraer 190	12	General Electric CF34
ATR 42	9	Pratt & Whitney PW127f (turbohelice)
ATR 72	7	Pratt & Whitney PW127f (turbohelice)
Cessna 208	10	Pratt & Whitney-114A (turbohelice)

Fuente: AVIANCA. Nuestra flota. Disponible en: www.avianca.com/es-us/informacion-viaje/antes-vuelo/flota.aspx (acceso: el 30 de Junio 2015).

Las aeronaves de mayor tamaño como lo son el Boeing 787 y Airbus A330 los mientras que las aeronaves de la familia A320 (A321,A320,A319,A318) son las de menor tamaño, cabe destacar que la mayor cantidad de aeronaves de toda la aerolínea son de la familia A320, todos ellos utilizan el mismo motor CFM 56-5 Series, siendo este el motor a reacción más utilizado por la aerolínea actualmente.

6.5.2 Motores usados por LAN Colombia. Por otro lado otra aerolínea que tiene bastante incidencia en el país es LAN y la flota que opera en el país como LAN Colombia se aprecia en la tabla 19 así como sus motores

Tabla 19. Flota actual de la aerolínea LAN Colombia

Flota LAN Colombia		
Aeronave	Unidades	Motor usado
Airbus A320	15	CFM 56 5-Series
Dash 8Q-200	2	Pratt & Whitney PW120A (Turbohélice)

Fuente: .LAN Colombia. Disponible en: http://www.lan.com/es_co/sitio_personas/experiencia-lan-y-tam/flota/lan/index.html (acceso: 30 Junio de 2015).

LAN cuenta para Colombia en su gran mayoría con la aeronave A320, el cual está equipado con el mismo motor que utiliza Avianca el CFM 56 5-Series, hay que destacar que la aerolínea LAN cuenta con una flota mucho más grande en cifras totales con su flota de Chile y los otros países en los que opera la aerolínea, pero las aeronaves que están destinadas para vuelos en Colombia son las citadas en la tabla 19.

6.5.3 Flota Viva Colombia. La flota de esta aerolínea se puede ver en la tabla 20.

Tabla 20. Flota actual de la aerolínea Viva Colombia

Flota Viva Colombia		
Aeronave	Unidades	Motor usado
Airbus A320	8	CFM 56 5-Series

Fuente: VIVA COLOMBIA. Conócenos. Disponible en: www.vivacolombia.co/co/conocenos.htm (acceso: 30 Junio de 2015).

Las ocho aeronaves de esta aerolínea son todas Airbus A320 y todas operan con el motor CFM 56 5-Series.

6.6 BIOQUEROSENO ESCOGIDO PARA CÁLCULOS DE EFICIENCIA

De los cuatro bioquerosenos en estudio se puede ver que los cuatro se pueden utilizar en la industria aérea ya que todos ellos se han usado en motores de reacción, además que para su utilización no se requieren modificaciones a los motores, como se menciona al inicio del capítulo para realizar los cálculos de eficiencia del bioqueroseno se tiene presente la situación actual de cada uno de ellos en el país, también que se hubiesen realizado vuelos nacionales con el bioqueroseno y un aspecto fundamental es que entre sus propiedades fisicoquímicas se encuentre con un poder calorífico cercano al del queroseno convencional Jet A-1.

Los cuatro bioquerosenos estudiados cuentan con algún avance en el país, algunos con más avances que otros, como es el caso de la *Jatropha* y la *Camelina*, las tierras necesarias y clima para su producción les permiten ser cultivados en el país y hoy en día se pueden encontrar estas plantas cultivadas para fines como biocombustible aunque el que cuenta con más tierras cultivadas es la *Camelina*; por otro lado las microalgas también se pueden producir en el país ya que no requieren algún tipo de tierra específico y del mismo modo ya se han realizado planes piloto con esta opción para producir biocombustible; por último el aceite de cocina usado es el que cuenta con el menor desarrollo en el país, principalmente porque no existe una normativa que permita la recolección del aceite para posteriormente transformarlo como biocombustible.

De los cuatro bioquerosenos el que más aceite produce para luego convertirlo en biocombustible es el de microalgas comparado con *Jatropha* y *Camelina*, mientras que la cantidad de aceite usado varía a nivel mundial. Por otro lado los costos de producción de la *Camelina* y la *Jatropha* son mucho más bajos comparados con los costos de producción de microalgas, esto principalmente por la cantidad de insumos necesarios para cuidado y mantenimiento.

En cuanto a la utilización de cada biocombustible en el país se tiene que la *jatropha* cuenta con 6 vuelos realizados de igual manera por parte de la *camelina* se realizaron 6 vuelos, cabe destacar que un vuelo comercial con *camelina* fue en Colombia por parte de la aerolínea LAN dando a este bioqueroseno un mayor avance a nivel nacional, mientras que la cantidad de vuelos realizados con microalgas es solo de dos vuelos y con el aceite de cocina usado se han realizado un total de 10 vuelos. En cuanto a su propiedades fisicoquímicas como principal característica se busca que el bioqueroseno tenga un valor cercano al poder calorífico del queroseno convencional es decir un valor de 43,1 MJ/kg, de los cuatro el que más se acerca a este valor es el bioqueroseno de microalgas con valor de 41

MJ/kg, le siguen la camelina y la Jatropha con un poder calorífico de 40 MJ/kg y por último se encuentra el aceite de cocina usado con un valor de 46,9 MJ/kg.

Según las características planteadas el bioqueroseno que se escoge para los cálculos de eficiencia es la camelina porque cuenta con muy buen desarrollo en el país, de los cuatro en estudio es el que requiere menos insumos para su producción y mantenimiento; produce una muy buena cantidad de aceite y no compite con tierras destinadas a cultivos alimentarios, también se han realizado varios vuelos a nivel mundial y además ya se ha realizado un vuelo con este tipo de bioqueroseno a nivel nacional, lo cual quiere decir que tiene un muy buen avance en el país, por parte de sus propiedades fisicoquímicas su poder calorífico es muy cercano al de los tres bioquerosenos en estudio y comparado con el Jet A-1 se encuentra con un valor de 3 MJ/kg por debajo, haciéndolo el bioqueroseno mas optimo a nivel nacional y por estas razones se escoge para realizar los cálculos de eficiencia.

6.7 MOTOR ESCOGIDO PARA CÁLCULOS DE EFICIENCIA

Con los datos de las aerolíneas operadoras a nivel nacional revisados, se puede ver que la aeronave que tiene mayor uso en el país es el Airbus A320, esta aeronave recibe el empuje del motor CFM 56 5-Series; este motor es totalmente apto para realizar vuelos con combustible de origen renovable, ya que como se puede ver en las tablas 5 y 6 del presente proyecto, se han realizado vuelos a nivel mundial con este tipo de aeronave sin realizar alguna modificación a sus motores, además de que ya se realizó un vuelo con bioqueroseno a nivel nacional, en una mezcla de un 70% Jet A-1 y el 30% restante fue del bioqueroseno proveniente de la camelina, arrojando resultados totalmente positivos y dando una gran viabilidad al uso de biocombustibles en Colombia en una aeronave que es ampliamente utilizada a lo largo del país.

Por lo tanto el motor escogido es el motor CFM 56 5-Series.

7. ÁNALISIS PARAMÉTRICO

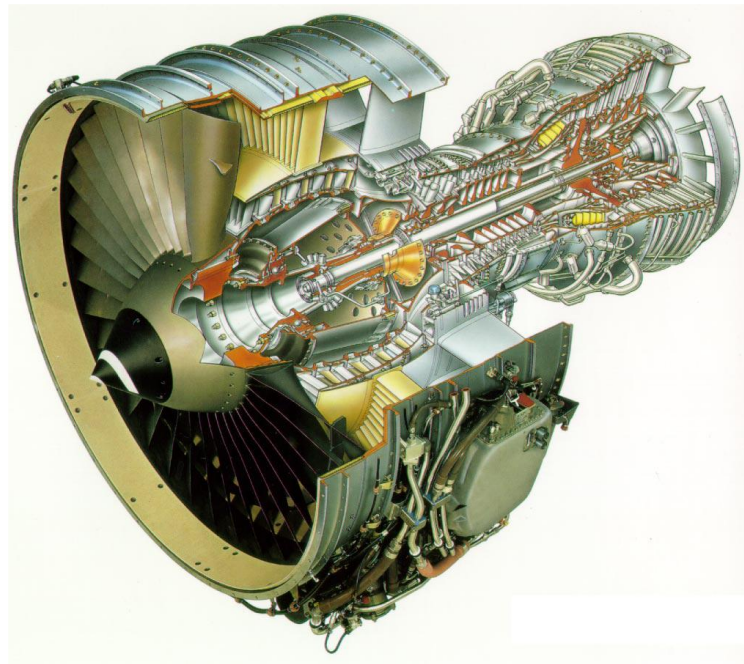
Con el motor escogido el cual es el CFM 56 5B-Series y el bioqueroseno derivado de la camelina, ahora se procederá a realizar el análisis paramétrico del motor CFM 56 5B-Series donde se calculan las temperaturas, presiones y velocidades en diferentes puntos del motor, con los datos obtenidos se podrá realizar los cálculos de eficiencia, los cuales son la eficiencia térmica, eficiencia propulsiva y la eficiencia total y de esta manera determinar qué tan viable es utilizar bioqueroseno.

7.1 CONDICIONES PARA CÁLCULOS

Las condiciones para la realización de los cálculos son las presentadas en un aeronave Airbus A320 viajando en vuelo crucero utilizando como combustible el bioqueroseno derivado de la camelina en un cien por ciento, es decir, si solo se utilizara este bioqueroseno sin mezclar con el Jet A-1, la aeronave vuela a una altitud de 10.000 metros y está equipada con motores CFM 56 5B-series; en la tabla 21 se muestran las especificaciones del mismo.

Las propiedades del motor son las siguientes

Figura 25. Motor CFM 56 5B



Fuente: CFM. Training Manual CFM 56 5B Basic manual. 2000 p.7

Tabla 21. Especificaciones Motor CFM 56-5B

CFM 56 5 Series	
En despegue	
Empuje Max	118000 N
Flujo másico de aire	397 kg/s
Empuje Max en ascenso	23400 N
Bypass Ratio (BPR)	6.0
Pressure Ratio	31.3
TSFC	0,343 lb/lb h
En vuelo crucero	
Flujo másico de aire	100 kg/s
Empuje máx. en crucero	22240 N
Velocidad crucero	0.8 Mach
TSFC	0,061 Kg/N hr

Fuente: CFM. Training Manual CFM 56 5B Basic manual y CFM Aeroengines CFM 56 5B

Para la realización de los cálculos se necesitan información tanto de la ficha técnica del motor como también conocer el nivel de rendimiento de cada elemento en el motor CFM 56 5B-Series, desde la admisión hasta la salida, para ello se toman estos datos del anexo 1 y anexo 2 donde se muestran los numeros de rendimiento según el tipo de motor y tecnología, también se ubica la temperatura máxima, los datos tomados del anexo son de tecnología nivel 4, por ser el motor CFM 56 5B un motor fabricado y utilizado después del año 2005 y por contar con tecnología de última generación; en la Tabla 22 se muestran los datos que se van a utilizar para el análisis paramétrico.

Tabla 22. Datos para el análisis paramétrico

Nombre	Símbolo	Valor	Unidades
Mach	M	0.8	
Presión a la entrada a 10000m	P_a	26,5	Kilopascales (Kpa)
Temperatura a la entrada a 10000 m	T_a	223,26	Grados Kelvin (K)
Bypass	β	6.1	
Coeficiente de dilatación adiabática del aire	γ_c	1.4	
Calor específico del aire a presión constante	C_{pa}	1.005	Kilo joule / Kilogramo grado kelvin (KJ/kg K)
Flujo másico de aire total del motor CFM 56 en vuelo crucero	\dot{m}_a	100	Kilogramo/Segundo (Kg/s)
Calor específico del gas de combustión a presión constante	C_{pg}	1,147	Kilo joule / Kilogramo grado kelvin (KJ/kg K)
Coeficiente de dilatación adiabática del gas	γ_g	1,33	
Poder calorífico del biocombustible de camelina	$Q_{netip\ cam}$	40000	Kilo joule/ Kilogramo (KJ/kg)
Poder calorífico del combustible Jet A1	$Q_{netip\ jet}$	42800	Kilo joule/ Kilogramo (KJ/kg)
Consumo específico de combustible del motor CFM 56	$TSFC$	0,061	Kilogramo/Newton hora(Kg/N hr)
Eficiencia isotrópico dispositivo de admisión	η_i	0,995	
Eficiencia del compresor	η_c	0,990	
Eficiencia del ventilador	η_f	0,89	
Eficiencia de la combustión	η_b	0,992	
Eficiencia de la turbina	η_t	0,90	
Eficiencia isentrópica de la tobera	η_l	0,98	
Eficiencia mecánica de la transmisión	η_m	0,997	
Temperatura a la salida de la turbina	T_{04}	1666	Kelvin (K)
Ratio de presión	R_{ct}	31,3	
Relación de compresión	R_c	1,4	
Temperatura máxima	T_{04}	1666	Kelvin (K)

Fuentes: MATTINGLY, Jack. Elements of propulsion: Gas Turbines and Rockets. 2006.
MATTINGLY, Jack. Aircraft Engine Design. 2002

7.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Para el análisis paramétrico se divide el motor CFM 56 5B-Series en diferentes etapas para el análisis en todo el motor para el caso del presente proyecto se dividió en 9 etapas las cuales son las siguientes y se pueden apreciar en la figura 26.

Etapas a: Condiciones de la atmósfera.

Etapas 01: Entrada del aire al motor.

Etapas 02: Entrada del aire al compresor.

Etapas 03: Entrada del aire a la cámara de combustión.

Etapas 04: Entrada del gas a la turbina de alta

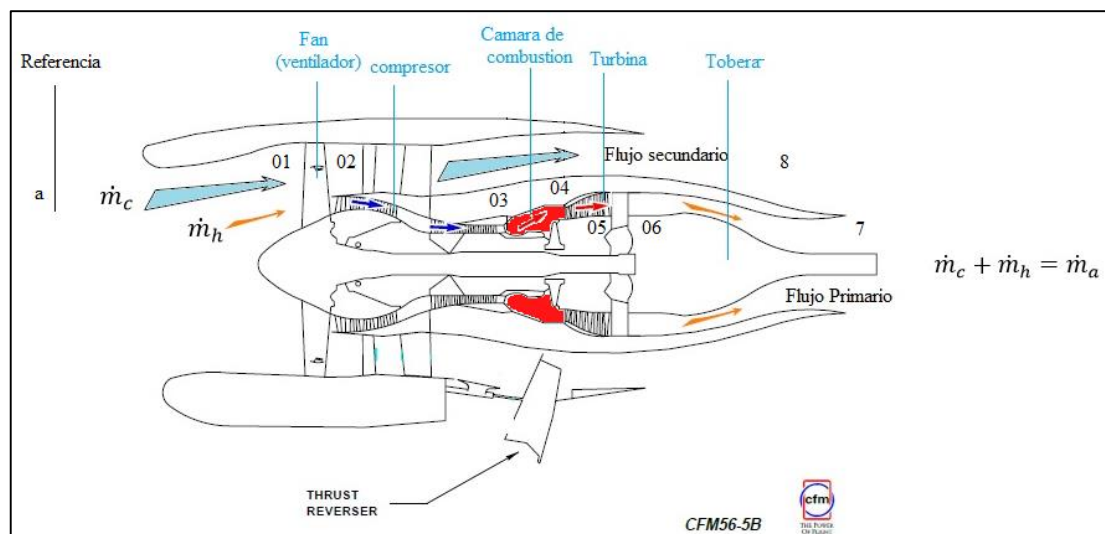
Etapas 05: Entrada del gas a la turbina de baja.

Etapas 06: Salida del gas de la turbina.

Etapas 07: Salida del gas de la tobera.

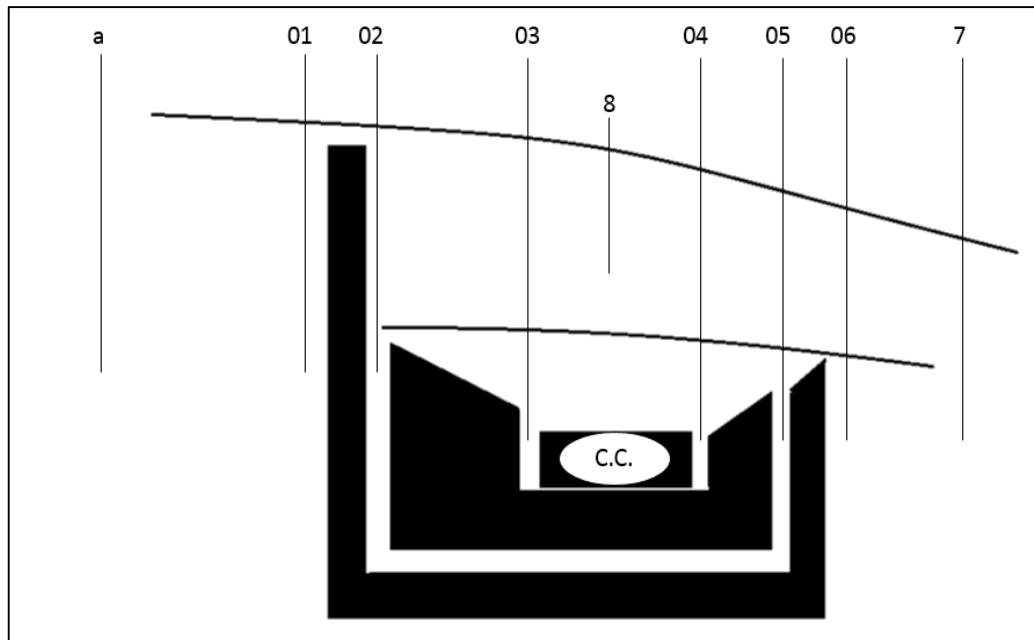
Etapas 08: Salida de los gases a la atmósfera.

Figura 26. Etapas análisis paramétrico.



Fuente: CFM. Training Manual. Modificado por Autor del proyecto.

Figura 27. Relación etapa de alta (HPT) y de baja (LPT) y ubicación de las temperaturas y presiones que se van a calcular



Fuente: Autor del proyecto.

7.2.1 Análisis corriente fría motor CFM 56 5B-Series.

- Velocidad real a la altitud V_a : Primero se calcula la velocidad verdadera a la altitud de vuelo la cual es de 10000 m, para ello se usa la siguiente ecuación.

Ecuación 12. Velocidad real según altitud de vuelo

$$V_a = M_a \sqrt{\gamma R T}$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006. p. 524

$$V_a = 0,8 \sqrt{(1,4) \left(0,287 \frac{kJ}{kgK} \right) (223,26 K)}$$

$$V_a = 239,6 \text{ m/s}$$

- Temperatura del aire a la entrada del motor CFM 56 5B T_{01} :

Ecuación 13. Temperatura a la entrada del motor

$$T_{01} = T_a + \frac{V_a^2}{2C_{pa}}$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.107

$$T_{01} = 223,26 \text{ K} + \frac{(239,6 \frac{m}{s})^2}{2 * 1,005 \frac{kJ}{kgK}}$$

$$T_{01} = 251,82 \text{ K}$$

- Presión del aire a la entrada al motor del CFM 56 5B P_{01} :

Ecuación 14. Presión a la entrada del motor

$$P_{01} = P_a \left[1 + \eta_i \frac{V_a^2}{2C_{pa}T_a} \right]^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c-1}}$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.108

$$P_{01} = 26,5 \text{ kPa} \left[1 + 0,995 \frac{(239,6m/s)^2}{2 \left(1,005 \frac{kJ}{kgK} \right) (223,26 \text{ K})} \right]^{\frac{1,4}{0,4}}$$

$$P_{01} = 29,87 \text{ kPa}$$

- Relación de compresión R_c : La relación de compresión está dada por la relación entre la presión de entrada al motor P_{01} y la presión a la entrada del compresor P_{02} .

Ecuación 15. Relación de compresión

$$R_c = \frac{P_{02}}{P_{01}}$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.126

Ya que se tiene el valor de la relación de compresión $R_c = 1,4$ se puede hallar la presión a la entrada del compresor P_{02} dejándose de la ecuación.

$$P_{02} = R_c * P_{01}$$

$$P_{02} = 29,87 kPa * 1,4$$

$$P_{02} = 41,81 kPa$$

- Temperatura a la entrada del compresor T_{02} .

Ecuación 16. Temperatura a la entrada del compresor

$$T_{02} - T_{01} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} - 1 \right]$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.58

$$T_{02} = 251,82 + \frac{251,82 K}{0,90} \left[(1,4)^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right]$$

$$T_{02} = 280,05 K$$

- Se debe determinar si la tobera de la corriente fría se obtura o no, para ello saber esto se define que:

$$\text{Relación de expansión normal} = \frac{P_{02}}{P_a}$$

$$\frac{P_{02}}{P_a} = \frac{41,81 kPa}{26,5 kPa} = 1,57$$

$$\text{Relación de expansión crítica} = P_{02}/P^*$$

Ecuación 17. Relación de expansión crítica

$$\frac{P_{02}}{P^*} = 1 / \left[1 - \frac{1}{\eta_l} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \right]^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1}}$$

Fuente: y HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.126

$$\frac{P_{02}}{P^*} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{0,98} \left(\frac{0,4}{2,4}\right)\right]^{\frac{1,4}{0,4}}} = 1,92$$

Si: La relación de expansión normal es mayor a la relación de expansión crítica la tobera se obtura.

$$\frac{P_{02}}{P_a} > \frac{P_{02}}{P^*}$$

La relación de expansión normal es mayor a la relación de expansión crítica la tobera no se obtura.

$$\frac{P_{02}}{P_a} < \frac{P_{02}}{P^*}$$

Según los resultados:

$$\frac{P_{02}}{P_a} < \frac{P_{02}}{P^*}$$

Según el resultado la tobera no se obtura. Ya que la tobera en la corriente fría no se obtura se tiene que la presión a la salida de la corriente fría es igual a la presión atmosférica $P_8 = P_a$

$$P_8 = 26,5 \text{ kPa}$$

- Flujo másico de aire por la corriente de aire fría generada por el ventilador \dot{m}_c

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a \beta}{\beta + 1}$$

$$\dot{m}_c = \frac{100 \text{ kg/s} * 6}{6 + 1}$$

$$\dot{m}_c = 85,71 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- Velocidad de salida por la corriente fría generada por el ventilador V_s

Ecuación 18. Velocidad de salida.

$$V_s = \sqrt{2 C_{pa}(T_{02} - T_8)}$$

Fuente: MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsion: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006. p. 524

Falta determinar el valor de T_8 del paréntesis en la ecuación

Ecuación 19. Temperatura a la salida de la corriente fría

$$T_{02} - T_8 = T_{02} \eta_I \left[1 - \left(\frac{1}{P_{02}/P_8} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} \right]$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.126

$$T_{02} - T_8 = (280,05 \text{ K})(0,98) \left[1 - \left(\frac{1}{41,81 \text{ kPa}/26,5 \text{ kPa}} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]$$

$$T_{02} - T_8 = 33,52 \text{ K}$$

$$T_8 = 280,05 \text{ K} - 33,52 \text{ K}$$

$$T_8 = 246,53 \text{ K}$$

Con el valor obtenido se calcula la velocidad de salida por la corriente fría del motor CFM 56 5B

$$V_s = \sqrt{2 C_{pa}(T_{02} - T_8)}$$

$$V_s = \sqrt{2(1,005 \text{ kJ/kgK})(33,52 \text{ K})}$$

$$V_s = 259,56 \text{ m/s}$$

- Velocidad efectiva de salida por la corriente fría generada por el ventilador V_{SEFF}

Ya que la tobera de la corriente fría no se obtura la presión a la salida es igual presión de entrada, es decir $P_0 = P_8$

Ecuación 20. Velocidad efectiva

$$V_{SEFF} = V_s + V_s^2 \frac{(1 - P_a/P_8)}{\gamma_c V_s}$$

Fuente: FAROKHI, Saaed. Aircraft Propulsion. Wiley. Washington. 2009. p.187

$$V_{SEFF} = 259,56 \text{ m/s} + 259,56^2 \text{ m/s} \left(\frac{1 - 1}{1,4 * 259,56 \text{ m/s}} \right)$$

$$V_{SEFF} = 259,56 \text{ m/s}$$

7.2.2. Análisis corriente caliente del motor CFM 56 5-Series

- Flujo másico de aire por la corriente de aire caliente generada por el sistema interno del motor \dot{m}_h

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a}{\beta + 1} = \frac{100 \text{ kg/s}}{6 + 1}$$

$$\dot{m}_c = 14,28 \text{ kg/s}$$

- Presión en la entrada de la cámara de combustión P_{03}

Para hallar esta presión se utiliza la ecuación de la relación de ratio de presión

$$R_{ct} = \frac{P_{03}}{P_{01}}$$

De allí se despeja la Presión en la entrada de la cámara de combustión P_{03}

$$P_{03} = R_{ct} P_{01}$$

$$P_{03} = 31,3 * 29,87 \text{ kPa}$$

$$P_{03} = 934,93 \text{ kPa}$$

- Temperatura a la entrada de la cámara de combustión T_{03} . Para este cálculo se utiliza la ecuación 16, pero en este caso se toma la temperatura a la entrada del compresor y se halla la temperatura a la entrada de la cámara de combustión.

$$T_{03} - T_{02} = \frac{T_{02}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{03}}{P_{02}} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} - 1 \right]$$

$$T_{03} = 280,05 \text{ K} + \frac{280,05 \text{ K}}{0,9} \left[\left(\frac{934,93 \text{ kPa}}{41,81 \text{ kPa}} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right]$$

$$T_{03} = 725,01 \text{ K}$$

7.2.2.1 Etapa de Alta

- Presión a la entrada de la turbina de alta P_{04}

Ecuación 21. Presión en turbina de alta

$$P_{04} = P_{03} \left(1 - \frac{\Delta P_b}{P_{03}} \right)$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.63

$$P_{04} = 934,93 \text{ kPa} \left(1 - \frac{(0,03 * 934,93)}{934,93 \text{ kPa}} \right)$$

$$P_{04} = 906,88 \text{ kPa}$$

- Cálculo temperatura a la salida de la etapa de alta T_{05} .

Por medio de la relación de la eficiencia mecánica de la transmisión se puede calcular la temperatura a la salida de la cámara de combustión; donde:

Ecuación 22. Eficiencia mecánica de la transmisión

$$\eta_m = \frac{W_{HPC}}{W_{HPT}}$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009.p.66

Donde:

η_m : Eficiencia mecánica en la transmisión.

W_{HPC} : Trabajo neto del compresor de alta (High Pressure Compressor).

W_{HPT} : Trabajo neto de la turbina de alta (High Pressure Turbine).

- El trabajo neto del compresor de alta se puede hallar por medio de la siguiente ecuación:

$$W_{HPC} = \dot{m}_h C_{pa} (T_{03} - T_{02})$$

- Por otro lado el trabajo neto de la turbina de alta se puede hallar por medio de la siguiente ecuación:

$$W_{HPT} = \dot{m}_h C_{pg} (T_{04} - T_{05})$$

Ya que se tiene el valor de la eficiencia mecánica en la transmisión $\eta_m = 0,97$; se iguala el trabajo neto del compresor y el trabajo neto de la turbina y se despeja el valor de la temperatura en la salida de la etapa de alta T_{05}

$$\eta_m W_{HPT} = W_{HPC}$$

$$\eta_m \dot{m}_h C_{pg} (T_{04} - T_{05}) = \dot{m}_h C_{pa} (T_{03} - T_{02})$$

Cancelando el flujo másico de aire caliente \dot{m}_h y despejando se obtendrá la temperatura a la salida de la etapa de alta T_{05} :

$$T_{05} = T_{04} - \frac{C_{pa} (T_{03} - T_{02})}{\eta_m C_{pg}}$$

Reemplazando:

$$T_{05} = 1666 \text{ K} - \frac{1,005 \text{ kJ/kgK} (725,01 \text{ K} - 280,05 \text{ K})}{0,97 * 1,147 \text{ kJ/kgK}}$$

$$T_{05} = 1264,07 \text{ K}$$

- Presión a la salida de la etapa de alta P_{05} :

Ecuación 23. Presión de alta

$$P_{05} = P_{04} \left[1 - \frac{T_{04} - T_{05}}{T_{04} \eta_T} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Fuente: GONZALES, Francisco. Ecuaciones utilizadas para el cálculo termo-gasodinámico en el ciclo del turborreactor. Aumento de temperatura en el compresor

$$P_{05} = 906,88 \text{ kPa} \left[1 - \frac{1666 \text{ K} - 1264,07 \text{ K}}{1666 \text{ K} * 0,9} \right]$$

$$P_{05} = 304,23 \text{ kPa}$$

7.2.2.2 Etapa de baja

- Cálculo temperatura a la salida de la etapa de alta T_{06} .

De igual manera que en la etapa de alta, por medio de la relación de la transmisión entre el ventilador y la turbina de baja se puede hallar la temperatura a la salida de la etapa de baja

Ecuación 24. Eficiencia mecánica de la transmisión

$$\eta_m = \frac{W_F}{W_{LPT}}$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.66

Donde:

η_m : Eficiencia mecánica en la transmisión.

W_F : Trabajo neto del ventilador (Fan).

W_{LPT} : Trabajo neto de la turbina de baja (Low Pressure Turbine).

- El trabajo neto del compresor del ventilador está dado por:

$$W_F = \dot{m}_a C_{pa} (T_{02} - T_{01})$$

- Por otro lado el trabajo neto de la turbina de baja se puede hallar por medio de la siguiente ecuación:

$$W_{LPT} = \dot{m}_h C_{pg} (T_{05} - T_{06})$$

Con el valor de la eficiencia mecánica en la transmisión $\eta_m = 0,97$; se iguala el trabajo neto del ventilador y el trabajo neto de la turbina y se despeja el valor de la temperatura en la salida de la etapa de baja T_{06}

$$\eta_m W_{LPT} = W_F$$

$$\eta_m \dot{m}_h C_{pg} (T_{05} - T_{06}) = \dot{m}_a C_{pa} (T_{02} - T_{01})$$

Despejando la temperatura T_{06} .

$$T_{06} = T_{05} - \frac{\dot{m}_a C_{pa} (T_{02} - T_{01})}{\eta_m \dot{m}_h C_{pg}}$$

Ya que el flujo másico de aire caliente es igual a: $\dot{m}_h = \dot{m}_a/(\beta + 1)$ se reemplaza en la ecuación en \dot{m}_h y se cancela el flujo másico de aire total, quedando la ecuación de la siguiente forma.

$$T_{06} = T_{05} - \frac{(\beta + 1)C_{pa}(T_{02} - T_{01})}{\eta_m C_{pg}}$$

Reemplazando:

$$T_{06} = 1264,07 \text{ K} - \frac{7 * 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} (280,05 \text{ K} - 251,82 \text{ K})}{0,97 * 1,147 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}}$$

$$T_{06} = 1085,57 \text{ K}$$

- Presión a la salida de la etapa de baja P_{06} :

Ecuación 25. Presión etapa de baja

$$T_{05} - T_{06} = T_{05} \eta_I \left[1 - \left(\frac{1}{P_{05}/P_{06}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right]$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009. p.112

Despejando la presión a la salida de la etapa de baja P_{06}

$$P_{06} = P_{05} \left[1 - \frac{T_{05} - T_{06}}{T_{05} \eta_I} \right]^{\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1}}$$

$$P_{06} = 304,23 \text{ kPa} \left[1 - \frac{1264,07 \text{ K} - 1085,57 \text{ K}}{1264,07} \right]$$

$$P_{06} = 164,71 \text{ kPa}$$

- Se debe determinar si la tobera de la corriente caliente se obtura o no, para ello saber esto se define que:

Relación de expansión normal = $\frac{P_{06}}{P_a}$

$$\frac{P_{06}}{P_a} = \frac{164,71 \text{ kPa}}{26,5 \text{ kPa}} = 6,21$$

Relación de expansión crítica = $\frac{P_{06}}{P^*}$

$$\frac{P_{06}}{P^*} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{\eta_I} \left(\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g + 1}\right)\right]^{\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1}}} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{0,98} \left(\frac{0,33}{2,33}\right)\right]^{\frac{1,33}{0,33}}} = 1,87$$

Si: La relación de expansión normal es mayor a la relación de expansión crítica la tobera se obtura.

$$\frac{P_{06}}{P_a} > \frac{P_{06}}{P^*}$$

La relación de expansión normal es mayor a la relación de expansión crítica la tobera no se obtura.

$$\frac{P_{06}}{P_a} < \frac{P_{06}}{P^*}$$

Según los resultados:

$$\frac{P_{06}}{P_a} < \frac{P_{06}}{P^*}$$

La tobera se obtura. Ya que la tobera en la corriente caliente se obtura las condiciones de presión y temperatura son los siguientes.

- La presión a la salida de la tobera es igual a la presión crítica a la salida de la tobera

$$P_7 = P^*$$

Ecuación 26. Presión crítica

$$P^* = P_{06} \left(\frac{1}{P_{06}/P^*} \right)$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009.p.127

$$P^* = 164,71 \left(\frac{1}{1,87} \right)$$

$$P_7 = P^* = 88,08 \text{ kPa}$$

- La temperatura a la salida de la tobera es igual a la temperatura crítica a la salida de la tobera

$$T_7 = T^*$$

Ecuación 27. Temperatura critica

$$T^* = T_{06} \left(\frac{2}{\gamma_g + 1} \right)$$

Fuente: HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009.p.127

$$T^* = 1085,57 \text{ K} \left(\frac{2}{1,33 + 1} \right)$$

$$T_7 = T^* = \mathbf{981,82 \text{ K}}$$

- La velocidad a la salida de la tobera está dada por la temperatura crítica.

$$V_7 = \sqrt{\gamma R T^*}$$

$$V_7 = \sqrt{(1,33) \left(0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) (931,82 \text{ K})}$$

$$\mathbf{V_7 = 596,39 \text{ m/s}}$$

- Velocidad efectiva a la salida de la tobera está dada igual que la ecuación 20 la diferencia son el valor de velocidad, presión y la constante de has

$$V_{7EFF} = V_7 + V_7^2 \frac{\left(1 - \frac{P_a}{P_7} \right)}{\gamma_g V_s}$$

$$V_{7EFF} = 596,39 \text{ m/s} + 596,39 \text{ m/s}^2 \frac{\left(1 - \frac{26,5 \text{ kPa}}{88,08 \text{ kPa}} \right)}{1,33 * 596,39 \text{ m/s}}$$

$$\mathbf{V_{7EFF} = 909,89 \text{ m/s}}$$

8. CÁLCULOS EFICIENCIA

8.1 EFICIENCIA TÉRMICA.

$$\text{Eficiencia Térmica} = \frac{\text{Energía mecánica producida}}{\text{Combustible necesario para obtenerla}}$$

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_s}{\dot{Q}_e}$$

Donde:

η_T = Eficiencia térmica del motor

\dot{W}_s = Potencia neta a la salida del motor

\dot{Q}_e = Rango de energía térmica liberada.

De esta ecuación se tiene que la potencia neta a la salida del motor \dot{W}_s se define como:

$$\dot{W}_s = \frac{1}{2} (\dot{m}_a + \dot{m}_f) V_s^2 - \dot{m}_0 V_a^2$$

Donde:

\dot{m}_a = Flujo másico de aire en peso que absorbe el motor.

\dot{m}_f = Flujo másico de combustible en peso que se inyecta al motor según la actitud del vuelo (despegue, crucero y aterrizaje)

V_s = Velocidad de salida de los gases por la tobera del motor

V_a = Velocidad de entrada del aire en el motor en metros por segundo (m/s) esta velocidad es la misma de la aeronave.

El rango de energía \dot{Q}_e se define como:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_f Q_{netip}$$

Donde:

\dot{m}_f = Flujo másico de combustible en peso que se inyecta al motor en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)

Q_{netip} = Poder calorífico del combustible en uso.

Por tanto la ecuación general de eficiencia térmica para un motor a reacción queda definida como:

$$\eta_T = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)V_s^2 - \dot{m}_a V_a^2}{2 \dot{m}_f Q_{netip}}$$

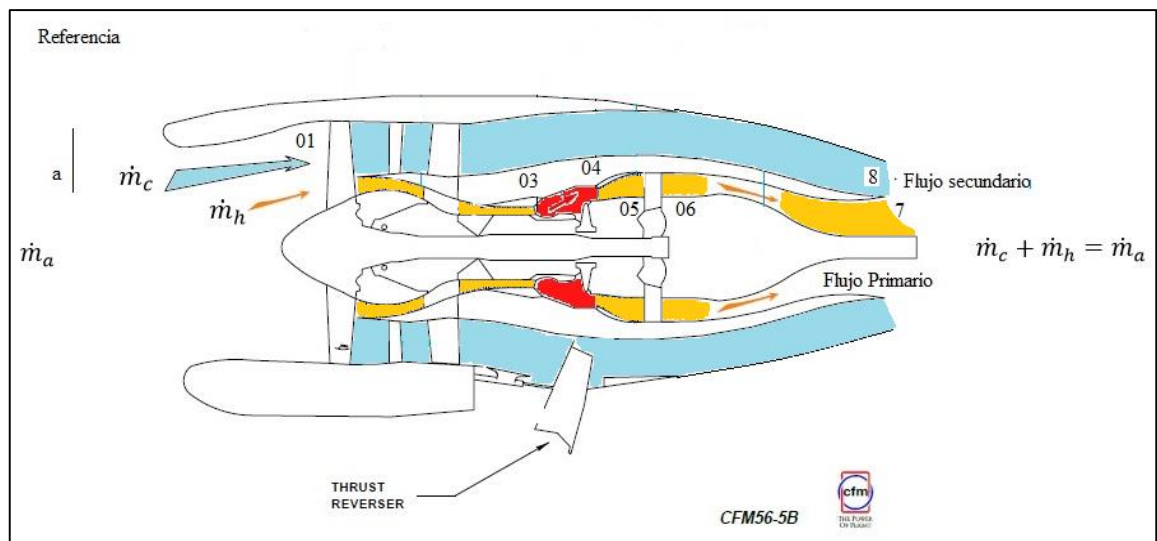
La ecuación de eficiencia térmica puede variar dependiendo el tipo de motor que se está usando; para el caso del presente proyecto es para un motor a reacción turboventilador para transporte comercial, es decir el motor CFM 56 5B, este motor es de doble flujo de aire con alta relación bypass, para hallar dicha eficiencia se tienen en cuenta no solo el flujo másico total \dot{m}_a como se muestra en la ecuacion general, sino tambien las dos vías por donde viaja el aire como lo son el flujo de aire primario \dot{m}_c y el secundario \dot{m}_h , para ello se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 28. Eficiencia térmica paran turbofan con bypass

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_c V_{SEFF}^2 + \dot{m}_h V_{7EFF}^2 - (\dot{m}_c + \dot{m}_a) V_a^2}{2 \dot{m}_f Q_{netip}}$$

FAROKHI, Saeed. Aircraft Propulsion Washington Ch 4. p.186

Figura 28. Distribución flujos másicos en motor Bypass CFM 56-5B



Fuente: CFM. Training Manual. Modificado por autor del proyecto

Donde:

- \dot{m}_c = Flujo másico de aire secundario, es la corriente de aire fría en peso que absorbe el motor CFM 56 5-series en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)
- \dot{m}_h = Flujo másico de aire primario, es la corriente de aire caliente en peso que absorbe el motor CFM 56 5-series en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)
- \dot{m}_a = Flujo másico de aire total en peso que absorbe el motor CFM 56 5-series en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)
- \dot{m}_f = Flujo másico de combustible en peso que se inyecta al motor en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)
- V_a = Velocidad de entrada del aire en el motor CFM 56 5-Series en metros por segundo (m/s) esta velocidad es la misma de la aeronave.
- V_s = Velocidad de salida del aire por el flujo de aire secundario del motor CFM 56 5-Series en metros por segundo (m/s)
- V_7 = Velocidad de salida de los gases por el flujo de aire primario del motor CFM 56 5-Series en metros por segundo (m/s)
- \dot{m}_f = Flujo másico de combustible en peso que se inyecta al motor en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)
- Q_{netip} = Poder calorífico del combustible en uso.

En este proyecto es de objeto de estudio, por tanto el valor que se va a utilizar en este caso es del poder calorífico de la camelina, aceite que ya se comercializa en el mundo para producción como biocombustible, el cual permite realizar mezclas junto con el queroseno convencional Jet A-1 y podría ser usado sin mezclar y no alterar el comportamiento del motor²⁴, se calculara la eficiencia ya que se quiere comparar la eficiencia térmica que ofrece el bioqueroseno derivado de la camelina comparado con la eficiencia térmica que ofrece el queroseno convencional Jet A1. El poder calorífico del bioqueroseno derivado la camelina es de 40000 KJ/kg y ese es el valor a utilizar en el cálculo de eficiencia térmica.

²⁴ LOPEZ Marian. Aceite de camelina el nuevo queroseno de los aviones. El futuro de los biocombustibles en aviación. Internet: <http://www.ambientologa.net/2015/09/aceite-de-camelina-el-nuevo-queroseno.html>

De todos los datos necesarios para determinar la eficiencia térmica no se tiene el flujo másico de combustible \dot{m}_f pero se tiene el consumo específico de combustible $TSFC$ y el empuje del motor T en crucero de la Tabla 21 del capítulo 7 y se puede hallar con la siguiente ecuación

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{T}$$

Donde:

$TSFC$ = Consumo específico de combustible en el motor CFM 56 5-Series

T = Empuje en el motor CFM 56 5-Series en vuelo crucero en Newtons (N)

\dot{m}_f = Flujo másico de combustible en peso que se inyecta al motor en vuelo crucero en kilogramos por segundo (kg/s)

$$TSFC = 0,596 \frac{lb}{lb\ h} = 0,0607 \frac{kg}{N\ h}$$

$$T = 22240\ N$$

- Despejando el flujo másico de combustible se tiene que:

$$\dot{m}_f = T * TSFC$$

Reemplazando valores

$$\dot{m}_f = 22240\ N * 0,0607 \frac{kg}{N\ h}$$

$$\dot{m}_f = 1439,96 \frac{kg}{h} * \frac{1h}{3600\ s}$$

$$\dot{m}_f = 0,375 \frac{kg}{s}$$

- Ahora se calcula la eficiencia térmica utilizando la camelina, ya que se tienen todos los datos necesarios para dicho cálculo con el análisis paramétrico realizado en el capítulo 7.

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_c V_{SEFF}^2 + \dot{m}_h V_{7EFF}^2 - (\dot{m}_c + \dot{m}_a) V_a^2}{2 \dot{m}_f Q_{netip\ JetA1}}$$

$$\eta_T = \frac{\left(85,71 \frac{kg}{s}\right) \left(259,56 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(14,28 \frac{kg}{s}\right) \left(909,89 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(85,71 \frac{kg}{s} + 100 \frac{kg}{s}\right) \left(239,6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(0,375 \frac{kg}{s}\right) \left(40000 \frac{kJ}{kg}\right)}$$

$$\eta_T = \frac{6935542,07 \text{ kg m/s}^3}{30000000 \text{ kg m/s}^3}$$

$$\eta_{T\ cam} = 0,2312$$

$$\eta_{T\ cam} = \mathbf{23,12\ \%}$$

- Eficiencia térmica usando el combustible tradicional Jet A1

$$\eta_T = \frac{\left(85,71 \frac{kg}{s}\right) \left(259,56 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(14,28 \frac{kg}{s}\right) \left(909,89 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(85,71 \frac{kg}{s} + 100 \frac{kg}{s}\right) \left(239,6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(0,375 \frac{kg}{s}\right) \left(42800 \frac{kJ}{kg}\right)}$$

$$\eta_T = \frac{6935542,07 \text{ kg m/s}^3}{32100000 \text{ kg m/s}^3}$$

$$\eta_{T\ jet\ A1} = 0,21606$$

$$\eta_{T\ jet\ A1} = \mathbf{21,60\ \%}$$

Al comparar los resultados de eficiencia se aprecia un aumento del 1,5 % al usar como biocombustible el bioqueroseno de camelina comparado con el Jet A1, quiere decir que la eficiencia térmica tiene una mejora, dando otra razón para continuar los estudios con la camelina y dar más pruebas de la viabilidad de su uso para ser usado como biocombustible de aviación.

8.2 EFICIENCIA PROPULSIVA

$$\text{Eficiencia Propulsiva} = \frac{\text{Energía útil para el vuelo}}{\text{Energía mecánica producida}}$$

$$\eta_P = \frac{TV_a}{\dot{W}_s}$$

Donde:

η_P = Eficiencia propulsiva del motor

T = Empuje del sistema propulsor

V_a = Velocidad de la aeronave

\dot{W}_s = Potencia neta a la salida del motor

Para el caso específico del presente proyecto la eficiencia propulsiva es para un motor a reacción turboventilador para transporte comercial, es decir el motor CFM 56 5B, este motor es de doble flujo de aire con alta relación bypass, para hallar dicha eficiencia se tienen en cuenta las velocidades de las dos corrientes tanto fría (V_{SEFF}) como caliente (V_{7EFF}) se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 29. Eficiencia propulsiva paran turbofan con bypass

$$\eta_P = \frac{2 V_a [V_{7EFF} + \alpha V_{SEFF} - (1 + \alpha) V_a]}{V_{7EFF}^2 + \alpha V_{SEFF}^2 - (1 + \alpha) V_a^2}$$

FAROKHI, Saeed. Aircraft Propulsion Washington 2008. p. 185

$$\eta_P = \frac{2 \left(239,6 \frac{m}{s} \right) \left[909,89 \frac{m}{s} + \left(6 * 259,56 \frac{m}{s} \right) - \left(7 * 239,6 \frac{m}{s} \right) \right]}{\left(909,89 \frac{m}{s} \right)^2 + \left(6 * \left(259,56 \frac{m}{s} \right)^2 \right) - \left(7 * \left(239,6 \frac{m}{s} \right)^2 \right)}$$

$$\eta_P = \frac{378596,96 \text{ m}^2/\text{s}^2}{830271,54 \text{ m}^2/\text{s}^2}$$

$$\eta_P = 0,456$$

$$\eta_P = 45,6 \%$$

8.3 EFICIENCIA GLOBAL

El rendimiento global viene determinado por el producto de los rendimientos del motor y la propulsión.

- Eficiencia global camelina

$$\eta_{Gcam} = \eta_{Tcam} \eta_p$$

$$\eta_{Gcam} = 0,2312 * 0,456$$

$$\eta_{Gcam} = 0,1054$$

$$\boldsymbol{\eta_{Gcam} = 10,54 \%}$$

- Eficiencia global con Jet A1

$$\eta_{G Jet A1} = \eta_{T Jet A1} \eta_p$$

$$\eta_{G Jet A1} = 0,216 * 0,456$$

$$\eta_{G Jet A1} = 0,098$$

$$\boldsymbol{\eta_{G Jet A1} = 9,8 \%}$$

En los resultados de la eficiencia global se confirma la mejora en el rendimiento del motor CFM 56 5B-Series utilizando biocombustible, en este caso el bioqueroseno derivado de la camelina, por tanto a nivel de eficiencia sí resultaría viable utilizar este biocombustible totalmente puro en uno de motor turbofan para uso comercial.

8.4 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

8.4.1 Desempeño de presión y temperatura. A continuación se grafican los resultados de temperatura y presión, en el motor CFM 56 5B-Series.

En la Tabla 23 se muestran los resultados de la presión y temperatura en cada etapa del análisis paramétrico del motor. El comportamiento de la presión es el indicado, donde a la entrada del motor (a) se tiene una presión del ambiente con un valor bajo y tiene un gran aumento por la corriente de aire caliente en las etapas de compresión aumenta la presión y al llegar a la cámara de combustión (3) se tiene la máxima presión del aire con una leve disminución debido a las pérdidas de compresión en la etapa de alta (4), posteriormente se disminuye el valor en la etapa de baja (5) y en la tobera sigue disminuyendo el valor de la presión (7) hasta la salida. En el flujo de aire secundario se ve como la presión a la entrada (a) y a la salida (8) es la misma debido a que la tobera en la corriente fría no se obtura, en el gráfico 3 se encuentra como fue el comportamiento de la presión descrito anteriormente.

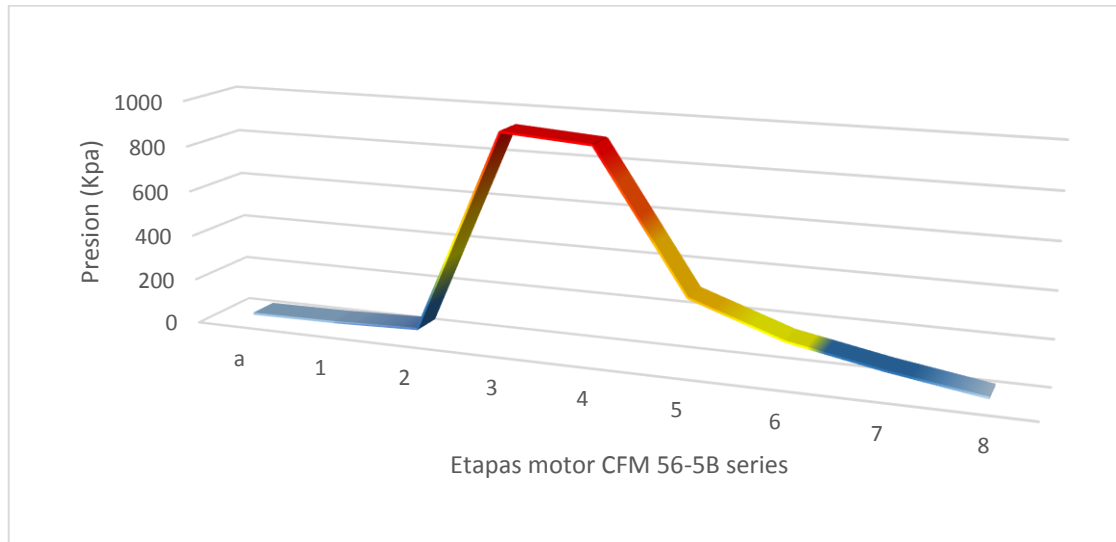
La temperatura se comporta de manera normal en este tipo de motor turbofan donde a la entrada se toma a temperatura ambiente (a) luego va en aumento y alcanza la máxima temperatura en la cámara de combustión a la salida (4) donde se realiza la mezcla de aire combustible para producir el gas, enseguida la temperatura va en disminución de su valor hasta la salida del motor, en este caso es CFM 56 5B-Series; en el gráfico 4 y figura 29 se puede apreciar el comportamiento.

Tabla 23. Resultados de temperatura y presión según en motor CFM 56 5B-Series

ETAPA	Presión (kPa)	Temperatura (K)
a	26,5	223,26
1	29,87	251,82
2	41,81	280,05
3	934,93	725,01
4	906,88	1666
5	304,23	1264,08
6	164,71	1085,57
7	88,08	981,82
8	26,5	246,53

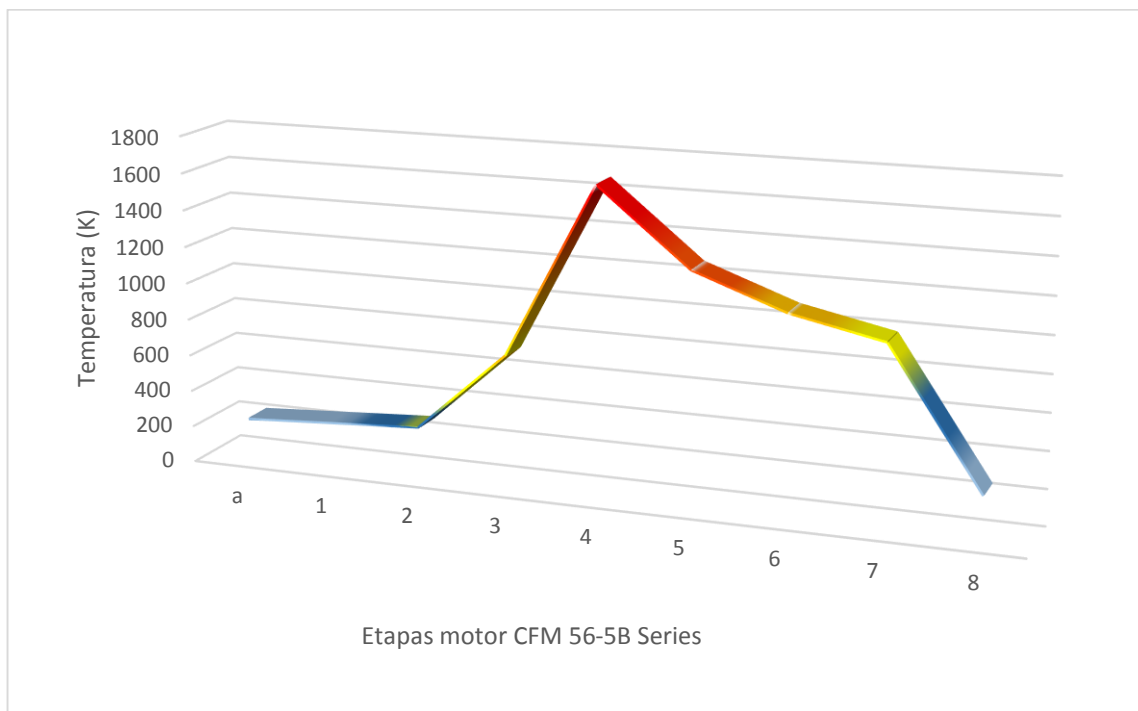
Autor: Autor del proyecto

Gráfica 3. Presión del motor CFM 56 5B-Series según etapa del motor



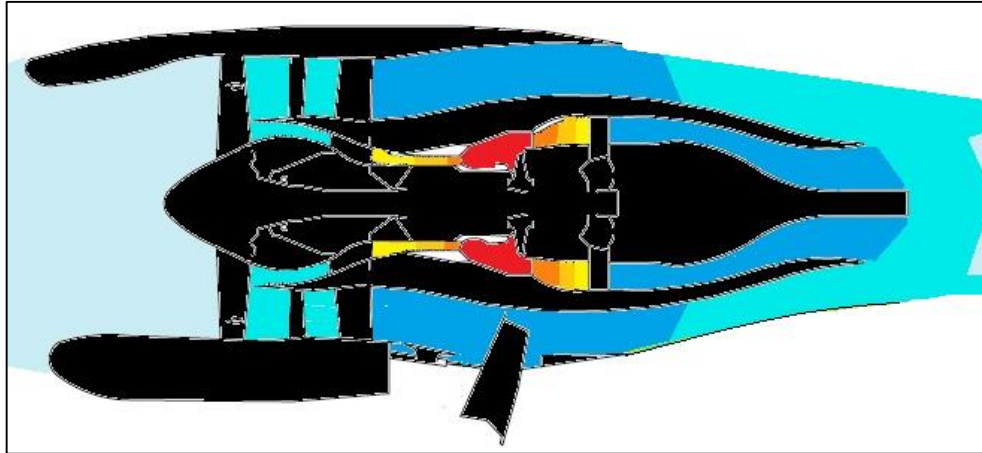
Fuente: Autor del proyecto

Gráfica 4. Temperatura del motor CFM 56 5B-Series según etapa del motor



Fuente: Autor del proyecto

Figura 29. Representación de temperaturas en motor CFM 56-5B Series



Fuente: CFM. Training Manual. Modificado por autor del proyecto

8.4.2 Desempeño de la eficiencia térmica. En los cálculos de eficiencia se aprecia un aumento en la eficiencia térmica y global al utilizar camelina, esto comparado con la utilización del queroseno convencional Jet A1; ahora resulta interesante saber si la eficiencia térmica se aumenta o disminuye al variar el flujo de aire que entra al motor CFM 56 5B-Series, es decir al variar la relación bypass, si cambia la cantidad de flujo de aire, la potencia del motor también, por tanto habría menos cantidad de transformación de energía para generar empuje y la eficiencia térmica variaría.

En la Tabla 24 se puede ver los resultados que se obtuvieron al cambiar el valor del bypass y en la Gráfica 5 se aprecia el comportamiento de la eficiencia térmica al usar como combustible la camelina así como del Jet A1; la eficiencia térmica en el motor CFM 56 5B-Series al utilizar camelina aumenta su porcentaje variando la relación bypass, además también aumenta la eficiencia térmica utilizando Jet A1; así mismo al comparar ambas eficiencias se puede ver que el porcentaje de variación con bypass cero es de 1,32% y con valor de bypass ocho es de 1,51% es decir que aumenta la diferencia de eficiencia térmica al usar camelina con respecto al Jet A1.

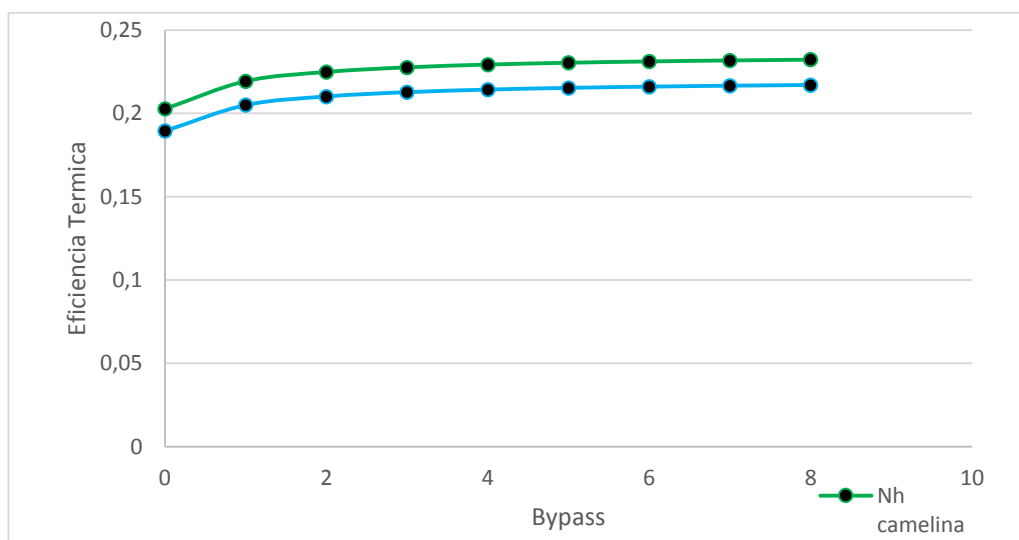
En el Gráfico 5 se aprecia el comportamiento de la eficiencia térmica al utilizar como combustible el bioqueroseno derivado de la camelina y al utilizar el queroseno Jet A1; se puede ver el aumento en la eficiencia con la camelina comparado con el Jet A y a medida que se aumenta el valor del bypass esta diferencia va en aumento. Para hacer de la gráfica 5 se tomaron los datos de la Tabla 24 y por medio de Excel se realizó la gráfica, donde se puede ver el comparativo de eficiencias térmicas.

Tabla 24. Comparativo de la eficiencia térmica usando bioqueroseno de camelina vs Jet A1 variando relación Bypass

Bypass	Eficiencia Térmica		Variación entre Cam. y Jet A1	Porcentaje de variación (%)
	Camelina	Jet A1		
0	0,202719777	0,189457736	0,01326204	1,32620415
1	0,219325167	0,204976791	0,01434838	1,434837538
2	0,224860296	0,21014981	0,01471049	1,471048668
3	0,227627861	0,212736319	0,01489154	1,489154232
4	0,2292884	0,214288224	0,01500018	1,500017571
5	0,230395426	0,215322828	0,0150726	1,507259797
6	0,231186159	0,216061831	0,01512433	1,512432815
7	0,231779209	0,216616083	0,01516313	1,516312579
8	0,232240469	0,217047168	0,0151933	1,519330173

Fuente: Autor del proyecto

Gráfica 5. Eficiencia térmica usando Camelina y Jet A1 vs Bypass



Fuente: Autor del proyecto

8.4.3 Desempeño de la eficiencia propulsiva. En la eficiencia propulsiva se puede apreciar que el resultado en el motor en análisis el CFM 56 5B-Series se encuentra por encima del rango promedio, es decir arriba del 30-40%, el resultado fue en este caso fue de 45% aproximadamente, esto quiere decir que además de usar un combustible amigable con el medio ambiente hay mayor cantidad de potencia útil en un vuelo comercial en un Airbus A320 usando motores CFM 56 5B-Series.

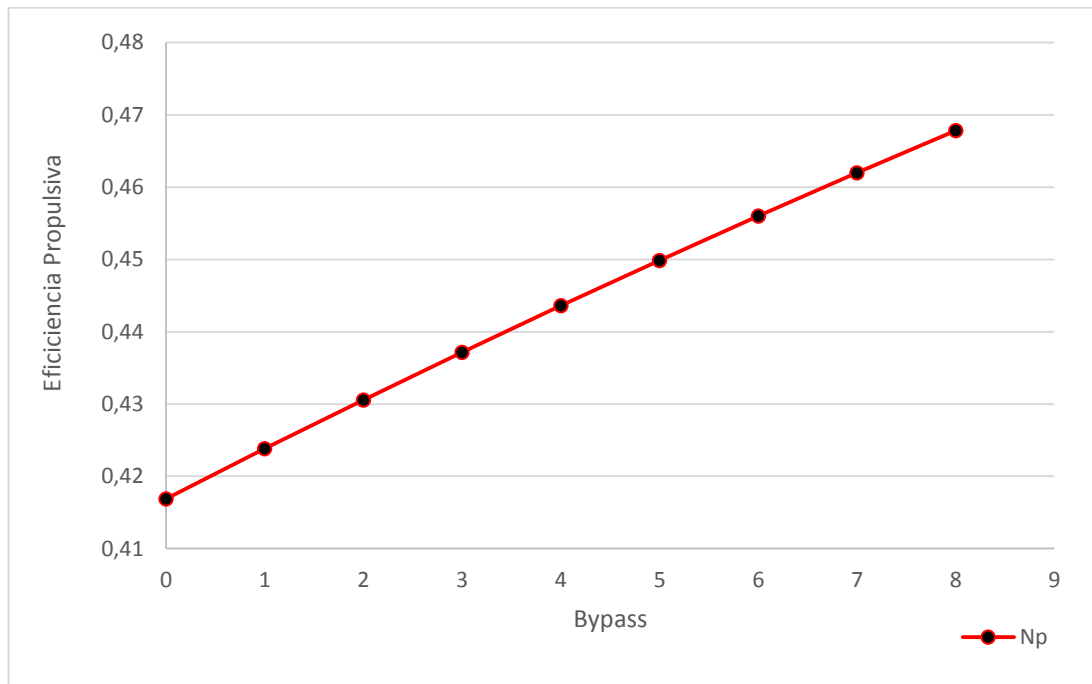
Al variar la relación bypass como en el caso de la eficiencia térmica, se puede ver en la Tabla 25 que el valor aumenta de manera lineal; es decir la eficiencia propulsiva es directamente proporcional a la relación bypass, esto se puede confirmar en el Gráfica 6, cuando la relación bypass es de cero la eficiencia propulsiva tiene el menor valor y a medida que aumenta el valor bypass la eficiencia también aumenta.

Tabla 25. Comparativo de la eficiencia térmica usando bioqueroseno de camelina vs Jet A1 variando el Bypass

Bypass	Eficiencia propulsiva
0	0,41688053
1	0,423814119
2	0,430572913
3	0,437163438
4	0,443591902
5	0,449864208
6	0,45598598
7	0,461962571
8	0,467799087

Fuente: Autor del proyecto

Gráfica 6. Eficiencia Propulsiva del Motor CFM 56-5B Series el vs Bypass



Fuente: Autor del proyecto

8.4.4 Desempeño de la eficiencia global. Para esta eficiencia el combustible que este en uso tiene incidencia en el resultado, por ser la eficiencia global producto de la eficiencia térmica y propulsiva; para el caso del presente proyecto la eficiencia global resulto mayor al utilizar en el motor CFM 56 5B-Series el bioqueroseno derivado de la camelina comparado con el queroseno Jet A1, la diferencia fue de alrededor 0,7% donde la eficiencia global se mejoró al usar combustible de origen renovable de camelina.

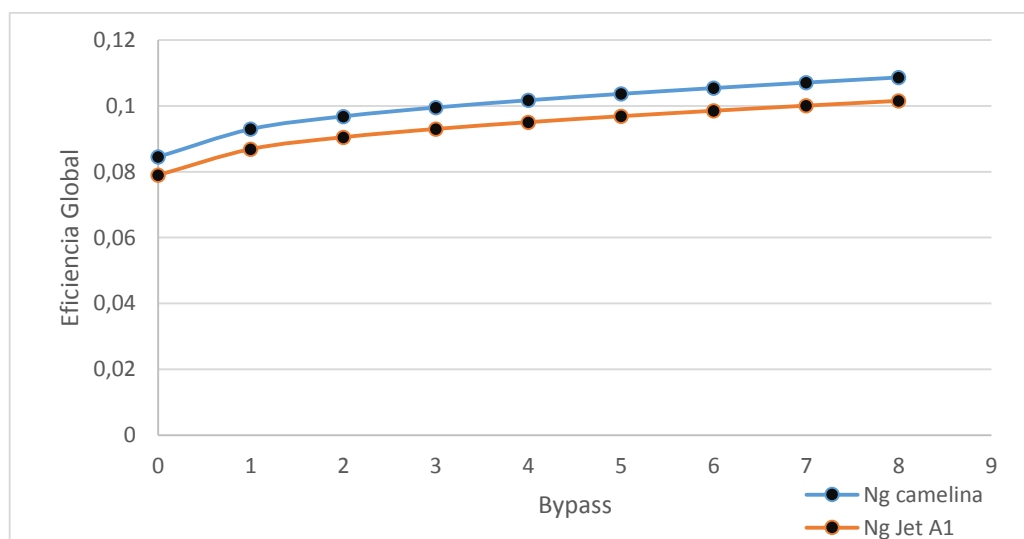
Al realizar la variación del valor del índice de doble flujo o bypass, se vio un aumento en ambos combustibles en estudio tanto de la camelina como del jet A1; por otro lado al comparar cual aumenta en mayor medida, se puede apreciar en la tabla 26 que la diferencia aumento a medida que el valor del índice del doble flujo se iba elevando, es decir que se puede ver el aumento en la eficiencia global con la camelina comparado con el Jet A y a medida que se aumenta el valor del bypass esta diferencia va en aumento como se puede ver en el Gráfico 7.

Tabla 26. Comparativo de la eficiencia global usando bioqueroseno de camelina vs Jet A1 variando relación Bypass

Bypass	Eficiencia Global		Variación	Porcentaje (%)
	Camelina	Jet A1		
0	0,084509928	0,078981241	0,005528687	0,552868688
1	0,092953102	0,086872058	0,006081044	0,608104408
2	0,096818753	0,090484816	0,006333937	0,63339371
3	0,099510578	0,093000541	0,006510038	0,651003784
4	0,101710477	0,095056521	0,006653956	0,665395647
5	0,103646656	0,096866034	0,006780622	0,678062235
6	0,105417647	0,098521166	0,006896482	0,689648159
7	0,107073319	0,100068523	0,007004797	0,700479658
8	0,10864188	0,101534467	0,007107413	0,710741268

Fuente: Autor del proyecto

Grafico 7. Eficiencia Global usando camelina y Jet A1 vs Bypass



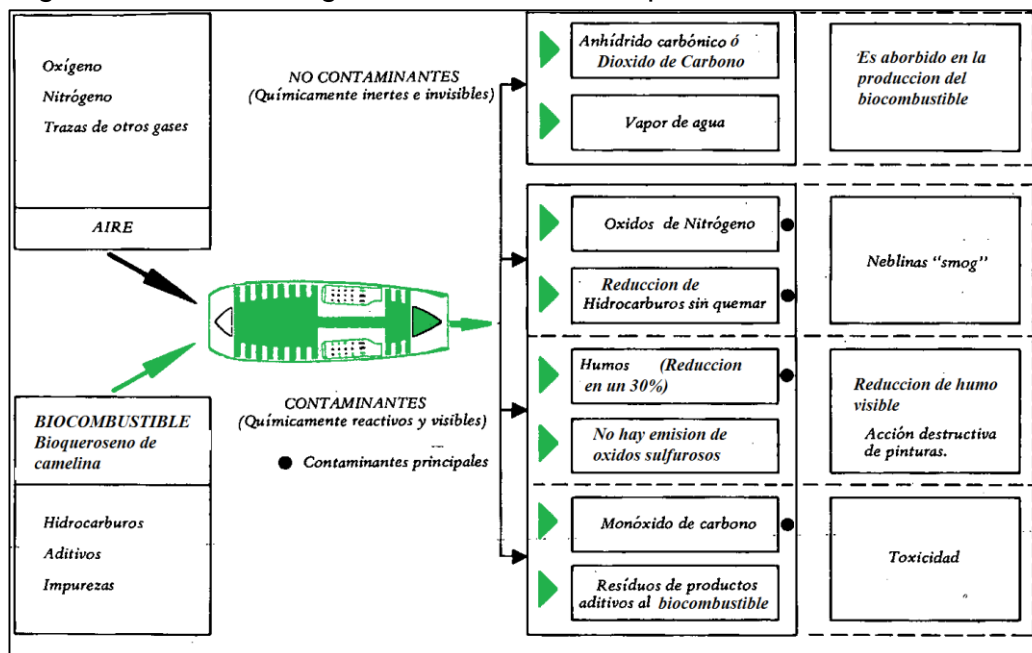
Fuente: Autor del proyecto

8.4.5 Emisiones generadas en la combustión biocombustibles. Las emisiones de gases efecto invernadero generadas en la combustión, se compensan al momento de la producción de la planta durante el cultivo ya que al momento de su producción absorbe el dióxido de carbono emitido por los motores desde la atmósfera, además que para la producción de camelina se requieren pocos insumos, quiere decir que para la obtención del mismo no se reemiten gases de efecto invernadero reduciendo así la contaminación ambiental.

También es importante destacar que “los biocombustibles no contienen azufre y emiten menos partículas durante su combustión”²⁵, de esta forma no se emitirían óxidos de sulfuro, confirmando así la reducción de contaminantes al momento de la combustión y también durante su obtención, además de mejorar la combustión y con esto se ayuda a la reducción de humos generados por el motor.

En la figura 30 se puede ver el comparativo de emisiones al usar como combustible el bioqueroseno de camelina

Figura 30. Emisiones generadas usando bioqueroseno de la camelina



Fuente: CUESTA ALVAREZ MARTIN. Motores a reacción. Madrid: Paraninfo. 1980 p. 441.
Modificado por autor del proyecto

²⁵ OBSA. Combustibles Alternativos para aviación 2010. p. 12. Disponible en: [http://www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/260/Combustibles_alternativos_aviacion_E S.pdf]

CONCLUSIONES

- Luego de haber escogido el biocombustible para la realización del análisis paramétrico y los cálculos de eficiencia se puede apreciar un aumento de un 1,5% en la eficiencia térmica en el motor CFM 56 5B-Series utilizando como combustible en un 100% el bioqueroseno derivado de la camelina en comparación con el queroseno convencional Jet A-1 como se aprecia en la gráfica 5, esto es principalmente por la diferencia en el valor del poder calorífico que existe entre los dos combustibles, quiere decir que la eficiencia térmica tiene mejora, demostrando que a nivel térmico es viable su uso como biocombustible de aviación.
- Con el bioqueroseno en estudio también se ve una incidencia en el resultado de la eficiencia global en el motor CFM 56 5B-Series; esto se da principalmente por ser este rendimiento producto de la eficiencia tanto propulsiva como térmica, dando como resultado un aumento al utilizar como combustible el bioqueroseno derivado de la camelina en comparación con el Jet A1, ratificando de esta manera la viabilidad del uso de la camelina como biocombustible de aviación a nivel de eficiencia ya que no solo iguala a la eficiencia global del combustible fósil convencional, sino que además la supera en un 0,68% al utilizarlo teóricamente puro para vuelos comerciales equipados con el motor CFM 56 5B-Series.
- La eficiencia térmica aumenta con la camelina, quiere decir que con la energía de este biocombustible se generará más potencia mecánica que la generada con el combustible convencional el queroseno Jet A1.
- Al utilizar este bioqueroseno como combustible de aviación se estaría ayudando a reducir las emisiones de gases efecto invernadero ya que aunque el motor siga generando emisiones, dichas emisiones serán utilizadas en la obtención y producción del biocombustible, cumpliendo así con el objetivo de reducir la contaminación en el medio ambiente.

- Este biocombustible se podría comenzar a implementar de manera más constante como combustible de aviación en el país y así se podría reducir no solo la contaminación si no también con la alta dependencia hacia el combustible derivado del petróleo el cual tiene una variación continua de precios y así usar este tipo de combustibles que son amigables con el medio ambiente, además que no es necesario usar tierras fértiles para producción de alimentos de consumo humano, ya que este tipo de planta es rustica, no requiere de muchos insumos y se adapta fácilmente a diferentes climas a nivel mundial y nacional siendo una planta prometedora para su producción en grandes extensiones.
- Con la implementación de biocombustibles se está ayudando al desarrollo en el sector agrícola, ya que se pueden utilizar tierras que son infértiles para la producción de alimentos de consumo humano y así aprovechar estas tierras para generar biocombustibles que ayudan a evitar la contaminación en la atmosfera

BIBLIOGRAFIA

- AIRBUS. Training Manual A320/A319/A318, ATA 71. Engine CFM 56-5 Series
- APPA. Hacia una aviación más ecológica gracias al uso de biocarburantes internet:<http://www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/137/Aviaci%C3%B3n_ecol%C3%B3gica_uso_biocarburantes_ES.pdf>
- ATAG. Air Transport Action Group. 2009 Begginer Guide to Aviation Biofuel Internet:<http://www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/261/Beginner_guide_aviation_biofuels_EN.pdf>
- AVELLANEDA VARGAS F. A. 2010, Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tesis doctoral. Universitat Rovira i Virgili,Tarragona. Internet<<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8588/Tesi.pdfsequence=1>>
- BRANS, Elodie. Biocombustibles de microalgas II. 2013. Internet: <<https://elodiebrans.wordpress.com/2013/09/04/biocombustibles-de-microalgas-ii/>>
- CARMONA, Aníbal Isidoro. Aerodinámica y Actuaciones del Avión. Madrid: Paraninfo, 2000. 610 p.
- CAAFI, Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative, Path to Alternative Jet Fuel Readiness. Internet: <http://www.caafi.org/information/pdf/Path_to_Aviation_Alternative_Fuel_Readiness_May_2013.pdf>
- COLOMBIANA DE BIOCOMBUSTIBLES, Presentación Piñón (Jatropha Curcas) 2012. Internet. <<http://colbio.blogspot.com/p/pinon-gil-6-altura-media-de-la-planta.html>>
- CONPES. Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia. 2008. Internet: <http://www.fedebiocombustibles.com/files/Conpes_35_10.pdf>

- CFMI. Training Manual CFM 56-5B, Basic Engine. 2000.
- CUESTA ALVAREZ, Martin. Motores a Reacción Tecnología y Operación de Vuelo. Paraninfo, Madrid: 1980. 555 p.
- CULTIVOS ENERGETICOS SRL.Ficha técnica de la jatropha curcas. 2008. Internet:<http://www.jatrophacurcasweb.com.ar/docs/ficha_tecnica_200807.pdf
- CHEVRON, Alternative Jet fuels. A supplement to Chevron's Aviation Fuels Technical Review. 2006. Internet:<https://www.cgabusinessdesk.com/document/5719_Aviation_Addendum._web.pdf>
- HULSMAN, H. REYDERS, J. Aalst, M. Algae as a source of fuel for the Dutch aviation sector, A feasibility Study. Deltares. 2011
- DLR Aeronautics. Biokerosene proven in flight operations. Internet:<http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid10204/296_read-2937/year-2012/#/gallery/5227>
- De la RUBIA GASSOL, María Rodríguez. Producción y propiedades del Bioqueroseno a partir del aceite de coco, Proyecto Fin de Master Energías renovables y eficiencia energética, Universidad de Castilla-La Mancha. Internet:<<http://www.fedebiocombustibles.com/files/Produccion%20y%20propiedades%20de%20bioqueroseno%20a%20partir%20de%20aceite%20de%20coco.pdf>>
- ECHAVARRIA RESTREPO, Juliana. El desarrollo sostenible y el reciclaje del aceite usado de cocina a la luz de la jurisprudencia y el ordenamiento jurídico colombiano. 2012. Internet:<http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552012000100011&script=sci_arttext>
- EL-SAYED, Ahmed. Aircraft propulsión and gas turbine engines. 2008. Boca Ratón Florida.
- Escuela universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica. Programa ingeniero técnico aeronáutico. Motores III. 2002. Internet<<http://www.euita.upm.es/sfs/E.U.I.T.%20Aeronautica/Delegacion%20d>

e%20Alumnos/docs/Apuntes%203ITA/Motores%20II%20-%20Transparencias%20de%20clase.pdf>

- FAROKHI, Saeed. Aircraft Propulsion. Wiley. Washington. 2009.
- FALASCA, Silvia. Salicornia, una especie promisorio para bioenergía en suelos salinos. Internet:<<http://latinoamericarenovable.com/2013/09/21/salicornia-una-especie-promisorio-para-bioenergia-en-suelos-salinos/>>
- FERNANDEZ LINARES, Luis Carlos. MONITIEL MONTOYA, Jorge. MILLAN OROPEZA, Aarón. BADILLO CORONA, Agustin. Produccion de biocombustibles a partir de microalgas. Internet:<<http://www.redalyc.org/pdf/461/46125177011.pdf>>
- GUERRERO, Marcela. Ecoeficiencia en la producción de biocombustibles a partir de aceites usados. Estudio de caso en tres arroyos, Argentina. 2014. Internet:<<http://www.eumed.net/rev/delos/19/biocombustibles.html>>
- GUTIERREZ LOPEZ, Miguel y ALBALAT Antonio. El cultivo de la camelina en Aragon.2013. Internet:<http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/AgriculturaGanaderiaMedioAmbiente/AgriculturaGanaderia/Areas/07_Formacion_Inovacion_Sector_Agrario/02_Centro_Transferencia_Agroalimentaria/Publicaciones_Centro_Transferencia_Agroalimentaria/IT_2013/IT_243-13.pdf>
- HERNANDEZ, Eduardo. El efecto invernadero. 2001. Internet:<<http://www.aie.org.ar/downloads/invernadero.pdf>>
- HERRERA RESTREPO Juan y VELEZ Julián. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible. Trabajo de grado tecnólogo químico. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad Tecnología Química. 2008. 91 p. internet:<<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1059/1/6626H565.pdf>>
- HIH Saravanamuttoo, GFC Rogers, H Cohen, PV Straznicky. Gas Turbine Theory. Pearson, Cornwall: 2009.

- IATA. IATA 2014 report on alternative fuels. 9 edition. 2014. Internet: <<http://www.iata.org/publications/Documents/2014-report-alternative-fuels.pdf>>
- ITAKA. El economista. Aceite de camelina, el carburante ideal para el transporte aéreo. Internet <http://www.obsa.org/Documentos%20compartidos/El_Economista_Itaka.pdf>
- IPCC. Aviation and the global atmosphere. Cambridge University Press. Internet <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/aviation/index.htm>
- KATAR, Duran. ARSLAN, Yusuf y SUBASI Iihan. Genotypic variations on yield, yield components and oil quality in some camelina (camelina sativa (L.) crantz) genotypes. 2012. Internet: <<http://www.field-crops.org/assets/pdf/product512f05f21c891.pdf>>
- KENOBI-LJN. Como funciona un motor a reacción (I). 2009 Internet: <http://www.enocasioneshagoclick.com/2009/06/escuadron-click-como-funciona-un-motor.html>
- KOSS, Diego Rubén. Producción y propiedades del Bioqueroseno a partir del aceite del palmiste, Proyecto Fin de Master Energías renovables y eficiencia energética. Universidad Castilla La-Mancha. Internet: <<http://www.fedebiocombustibles.com/files/Trabajo%20fin%20de%20master-DK.pdf>>
- LLAMAS, Alberto. AL-LAL Ana María. HERNANDEZ, Miguel. LAPUERTA, Magín. CANOIRA Laureano. Biokerosene from Babassu and Camelina Oils: Production and Properties of Their Blends with Fossil Kerosene. Energy and Fuels. 2012. Internet: <<http://es.scribd.com/doc/177362345/Biokerosene-From-Babassu-and-Camelina-Oils#scribd>>
- MACIEL Carlos Álvarez. Biocombustibles: Desarrollo Histórico Tecnológico, Mercados Actuales y Comercio Internacional. 2009. Internet: <http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQ_biocombustibles_4a_generacion_25608.pdf>

- MATTINGLY, Jack D. Aircraft Engine Design. Virginia. 2002.
- MANTINGLY, Jack D. Elements of propulsión: Gas turbines and Rockets. Virginia: 2006.
- N.R.Chakraborty, S C Sarkar. Development of a biofuel lamp and its comparison with a kerosene lamp. Journal of Energy in Southern Africa. 2008. Internet:<<http://www.erc.uct.ac.za/jesa/volume19/19-2jesa-chakraborty.pdf>>
- NREL. National Renewable Energy Laboratory. Biodiesel handling and use guide. 2009. Internet: <<http://www.biodiesel.org/docs/using-hotline/nrel-handling-and-use.pdf?sfvrsn=4>>
- NASA/TM, 2006 Alternative Fuels and Their Potential Impact on Aviation. Internet:<http://www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/41/Alternative_FuelPotencial_Impact_Aviation_EN.pdf>
- OÑATE, Antonio Esteban. Conocimientos del Avión. Paraninfo, Madrid: 2007.
- OSSA BASAÑES, Federico José. Cultivos energéticos para biocombustibles. Universidad nacional del cuyo. Trabajo de revisión bibliográfica. Argentina. Internet:<<http://www.imd.uncu.edu.ar/upload/cultivos-energeticos-final.pdf>>
- Profesores en línea. El efecto invernadero. 2011. Internet: <http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Efecto_invernadero.htm>
- PATIL, Prafulla. GUDE Veera Gnaneswar y DENG Shuguang. Transesterification of camelina sativa oil using supercritical and subcritical methanolwith cosolvents. Internet: <http://www.academia.edu/6092987/Transesterification_of_Camelina_Sativa_Oil_using_Supercritical_and_Subcritical_Methanol_with_Cosolvents>
- ROSKAM Jan, CHUAN-TAU Eduar Lan. Airplane Aerodynamics and Performance. Kansas DAR Corporation. Kansas: 1997.
- RODRIGUEZ FERNANDEZ, José. Estudio bibliográfico y experimental de las emisiones y prestaciones de un motor trabajando con biodiesel. Tesis doctoral. Universidad Castilla - La Mancha. 2007. Internet: <<https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/977>>

- SANCHEZ RAMOS, Jorge Alberto. *Algoritmos de mejoramiento de las características de la turbina refrigerada*, Tesis Ingeniería en sistemas energéticos, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México 2010 Internet:<<http://tesis.ipn.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/10365/143.pdf?sequence=1>>
- SANTAMARIA, Jesús. Forzamiento radiactivo y cambios químicos en la atmosfera. Artículo científico. Madrid. Universidad Complutense de Madrid. Facultad Ciencias Químicas. 2010. Internet: <<http://www.rac.es/ficheros/doc/00914.pdf>>
- SNV-SERNA, 2012 Guía técnica ambiental para el cultivo de la *Jatropha Curcas*. Internet:<http://www.snvworld.org/files/publications/guia_bp_pinon_web.pdf>
- TARIFA C. S. Motores de Reacción y Turbinas de Gas. Paraninfo, Madrid: 1951. 528 p.
- TARIFA C. S. Contaminación atmosférica producida por turborreactores y turbinas de gas. Artículo científico. Madrid: 1970. 10p. Internet: <<http://aerobib.aero.upm.es/cst/bibliografia/A22.pdf>>
- TEXO, Juan Pablo. BETANCOUR Ignacio y DUQUE Juan Pablo. Perspectivas Generales de desarrollo de la industria de los biocombustibles en Uruguay. Trabajo de investigación monográfica para la obtención del título de contador público. Universidad de la Republica Uruguay. Internet: <<http://www.alur.com.uy/articulos/2009/biocombustibles-liquidos-en-uruguay-perspectivas-generales-de-desarrollo.pdf>>
- UNAL. Caracterización morfofisiológica de *Jatropha curcas* L. variedad Brasil cultivada en dos zonas de Colombia. Internet. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/13985/14932>
- WU Xuan y LEUNG Dennis Orthogonal array design for biodiesel production optimization – using ultrasonic-assisted transesterification of *Camelina sativa* L. Crantz oil. 2011. <http://www.ep.liu.se/ecp/057/vol1/011/ecp57vol1_011.pdf>

ANEXO 1. Datos de rendimiento según el tipo de motor y tecnología.

Component	Figure of merit	Type ^a	Level of technology ^b			
			1	2	3	4
Diffuser	$\pi_{d\max}$	A	0.90	0.95	0.98	0.995
		B	0.88	0.93	0.96	0.98
		C	0.85	0.90	0.94	0.96
Compressor	e_c		0.80	0.84	0.88	0.90
Fan	e_f		0.78	0.82	0.86	0.89
Burner	π_b		0.90	0.92	0.94	0.95
	η_b		0.88	0.94	0.99	0.999
Turbine	e_t	Uncooled	0.80	0.85	0.89	0.90
		Cooled		0.83	0.87	0.89
Afterburner	π_{AB}		0.90	0.92	0.94	0.95
	η_{AB}		0.85	0.91	0.96	0.99
Nozzle	π_n	D	0.95	0.97	0.98	0.995
		E	0.93	0.96	0.97	0.98
		F	0.90	0.93	0.95	0.97
Mechanical shaft	η_m	Shaft only	0.95	0.97	0.99	0.995
		With power takeoff	0.90	0.92	0.95	0.97
Maximum T_{t4}		(K)	1110	1390	1780	2000
		(R)	2000	2500	3200	3600
Maximum T_{t7}		(K)	1390	1670	2000	2220
		(R)	2500	3000	3600	4000

^aA = subsonic aircraft with engines in nacelles D = fixed-area convergent nozzle
B = subsonic aircraft with engine(s) in airframe E = variable-area convergent nozzle
C = supersonic aircraft with engine(s) in airframe F = variable-area convergent-divergent nozzle
^bNotes: Stealth may reduce $\pi_{d\max}$, π_{AB} , and π_n . The levels of technology can be thought of as representing the technical capability for 20-yr increments in time beginning in 1945. Thus level 3 of technology presents typical component design values for the time period 1985–2005.

Fuente: Mattingly, Jack D. Elements of propulsion: Gas Turbines and Rockets. 2006.

ANEXO 2 Datos de temperatura según el número de Bypass

Engine type	Compressor pressure ratio (π_c)	Fan pressure ratio (π_f)	Bypass ratio (α)	T_{i7} , °R	T_{i4} , °R	F/\dot{m}_0 , lbf/lbm/s	S , 1/h
Turbojet no A/B	10–20	—	—	—	2000 3000	54–58 93–96	1.0–1.1 1.3–1.4
Turbojet with A/B	10–20	—	—	3600	2000 3000	94–101 115–119	2.0–2.2 1.7–1.8
Turbofan low α no A/B	20–30	2–4	0.2–1	—	2000 3000	23–47 53–84	0.85–1.0 0.96–1.5
Turbofan low α with A/B	8–30 10–30	2–4	0.2–1	3600	2000 3000	75–98 102–116	2.1–2.7 1.7–2.0
Turbofan high α no A/B	30–40	1.4–1.6 1.4–4	5–7.5 5–10	—	2000 3000	5.5–12 13–27	0.76–0.97 0.67–1.03

Fuente: Mattingly, Jack D. Aircraft Engine Design. 2002.